N° D'ORDRE :
29.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. L. VERAIN,
Ingénieur I. E. N.,
Chargé de Cours à la Faculté des Sciences d'Alger.

1re **THÈSE.** — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LA CONSTANTE DIÉLECTRIQUE DES GAZ.

2e **THÈSE.** — MÉTALLURGIE AU FOUR ÉLECTRIQUE DU FER ET DE SES ALLIAGES PEU FUSIBLES.

Soutenues le novembre 1912, devant la Commission d'Examen.

MM. GUNTZ, *Président.*
GUTTON, } *Examinateurs.*
ROTHÉ, }

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1912

N° D'ORDRE :
29.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. L. VERAIN,

Ingénieur I. E. N.,
Chargé de Cours à la Faculté des Sciences d'Alger.

1re **THÈSE.** — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LA CONSTANTE DIÉLECTRIQUE DES GAZ.

2e **THÈSE.** — MÉTALLURGIE AU FOUR ÉLECTRIQUE DU FER ET DE SES ALLIAGES PEU FUSIBLES.

Soutenues le **novembre 1912, devant la Commission d'Examen.**

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

MM. GUNTZ, *Président.*
GUTTON, ROTHÉ, *Examinateurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

—

1912

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

	MM.	
Doyen	FLOQUET, ✻, I. ✪.	
Assesseur	PETIT, ✻, I. ✪, ✪.	
Professeurs honoraires	HALLER, C ✻, I ✪.	
	BLONDLOT, O ✻, I ✪.	
	CARTAN, ✻, I ✪.	
	BLAISE, I ✪.	
	LE MONNIER, ✻, I ✪, ✪.	
Chargé de cours honoraire	MILLOT, I ✪.	
Professeurs	FLOQUET, ✻, I ✪	Analyse.
	THOULET, ✻, I ✪	Géologie et Minéralogie.
	MOLK, ✻, I ✪	Mécanique rationnelle.
	CUÉNOT, I ✪, O ✪	Zoologie.
	GUNTZ, ✻, I ✪	Chimie minérale.
	VOGT, I ✪	Mathématiques appliquées.
	PETIT, ✻, I ✪, ✪	Chimie agricole.
	MULLER, I ✪	Chimie physique et électrochimie.
	NICKLÈS, ✻, I ✪	Géologie.
	MINGUIN, I ✪, ✪	Chimie.
	GUTTON, I ✪	Physique.
	ROTHÉ, I ✪	Physique.
	GRIGNARD, I ✪	Chimie organique.
	GUYOT, I ✪	Chimie appliquée à la teinture et à l'impression.
	WAHL, I ✪	Chimie industrielle.
	HUSSON, A ✪	Calcul différentiel et intégral.
	N...	Botanique.
Professeurs adjoints	GAIN, I ✪	Botanique.
	BOUIN, I ✪, ✪	Zoologie appliquée.
	REBOUL, A ✪	Physique.
Maître de Conférences	MAUDUIT, I ✪	Électrotechnique.
Directeurs de Laboratoires	HAHN, I ✪	Laboratoire de Mécanique appliquée.
	WENCELIUS, I ✪	Laboratoire d'analyses industrielles.
Chargés d'un cours complémentaire	MARSAL, I ✪	Météorologie.
	DUMAS	Mécanique appliquée.
Secrétaire	ROVEL, I ✪.	

50734 Paris. — Imp. GAUTHIER-VILLARS, 55, quai des Grands-Augustins.

A

MONSIEUR BLONDLOT,

PROFESSEUR HONORAIRE A L'UNIVERSITÉ DE NANCY.

Hommage respectueux.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547223_0031

PREMIÈRE THÈSE.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA

CONSTANTE DIÉLECTRIQUE DES GAZ.

INTRODUCTION.

C'est en 1837 que Faraday (13) a découvert la propriété des corps isolants, qu'il désigna sous le nom de *pouvoir inducteur spécifique*, et cette découverte fut le point de départ de nombreux travaux : il s'agissait là d'une propriété nouvelle et fondamentale de la matière. Aussi, de nombreux expérimentateurs ont-ils entrepris, à la suite de Faraday, l'étude des isolants connus à ce point de vue nouveau.

Des méthodes, qui aujourd'hui semblent des plus grossières, purent immédiatement conduire les chercheurs à des résultats dans le cas des corps solides et liquides. Pourtant Faraday, lui-même, chercha en vain à montrer qu'un condensateur à diélectrique gazeux change de capacité lorsqu'on modifie la nature de ce gaz ou les

Nota. — Les numéros placés dans le texte renvoient à la Bibliographie, page 111.

conditions dans lesquelles il se trouve placé. Faraday avait étudié plus de vingt gaz dans les conditions de température et de pression les plus variées, et tous ces nombreux essais furent infructueux, si bien qu'il semble avoir admis finalement que tous les gaz possèdent un même pouvoir inducteur spécifique, de même qu'on croyait à cette époque qu'ils avaient un même coefficient de dilatation.

En 1865, Maxwell (36) fit connaître qu'il devait exister entre le pouvoir inducteur spécifique R et l'indice de réfraction n d'une substance, une relation

$$K = n^2.$$

Cette relation donne, pour les gaz, une valeur du pouvoir inducteur spécifique extrêmement voisine de l'unité et l'on s'expliqua que les expériences de Faraday étaient insuffisamment précises pour permettre de déceler l'existence du pouvoir inducteur spécifique des gaz.

L'étude des gaz reprenait dès lors un intérêt plus marqué : les gaz jouissent de propriétés spéciales que ne partagent pas les solides et les liquides; ils se comportent d'une façon simple dans un grand nombre de cas, ne présentent pas de résidu; on pouvait donc espérer trouver dans leurs propriétés une confirmation de la nouvelle théorie.

C'est seulement en 1874 que Boltzmann (5) adressa, à l'Académie des Sciences de Vienne, un Mémoire dans lequel il annonçait avoir réussi à découvrir et à mesurer des différences dans *la capacité inductive* des gaz. Il avait imaginé une méthode aussi ingénieuse que délicate à mettre en œuvre. Il semble que ce soit seulement grâce à son habileté extraordinaire qu'il put, avec l'appareil qu'il décrit, arriver à des résultats que n'ont pas infirmés les méthodes plus précises employées depuis.

Voici quel était en résumé le dispositif de ce savant :

Il utilisait un condensateur dont les deux plateaux horizontaux étaient séparés par des cales en gomme laque; cet appareil était contenu dans une enveloppe où l'on pouvait introduire un gaz quelconque. Ayant introduit, d'abord, de l'air atmosphérique, Boltzmann portait l'armature supérieure à un potentiel V de 300 volts au-dessus de celui du sol, l'armature inférieure étant réunie au sol; puis il supprimait la pile et remplaçait l'air de constante diélectrique K_1 par un gaz de constante K_2; les charges restaient les mêmes, mais le potentiel en chaque point du condensateur variait et l'on sait qu'il était réduit dans le rapport $\frac{K_1}{K_2}$; en réunissant l'armature inférieure à un électromètre et la supérieure à une pile, il observait une déviation de l'électromètre, proportionnelle à

$$V\left(1-\frac{K_1}{K_2}\right);$$

il étalonnait ensuite son appareil pour connaître la déviation correspondant à un potentiel donné; il pouvait ainsi déterminer $\frac{K_1}{K_2}$; il rapportait les nombres trouvés au pouvoir inducteur spécifique d'un vide de 5^{mm} à 10^{mm} de mercure.

Les résultats de Boltzmann confirmèrent la relation de Maxwell.

Il n'en fut pas de même de ceux que Ayrton et Perry (2) publièrent trois ans plus tard. Ils eurent le mérite de montrer d'une façon indiscutable, et tout à fait indépendante des expériences de Boltzmann, dont ils n'avaient pas eu connaissance, qu'il existe une différence entre les divers gaz au point de vue diélectrique; néanmoins leurs résultats semblent perdre de l'intérêt au fur et à mesure que d'autres expérimentateurs viennent confirmer les nombres de Boltzmann.

Ayrton et Perry utilisaient deux condensateurs C_1 et C_2 dont l'un était constamment rempli d'air, tandis que l'autre pouvait recevoir un gaz quelconque. Une des paires d'armatures étant réunies au sol, ils portaient les autres armatures respectivement à des potentiels $+V$ et $-V$; puis ils les réunissaient ensemble à un électromètre à quadrants; ce dernier indiquait une déviation proportionnelle à $V(C_1 - C_2)$. Ils recommençaient l'opération en chargeant à ρ les deux armatures chargées précédemment à $+V$ et $-V$; l'électromètre donnait une déviation proportionnelle à $\rho(C_1 + C_2)$. Ils en déduisaient la valeur du rapport $\frac{C_1}{C_2}$. Cette comparaison faite avec le second condensateur vide, puis plein de gaz, permettait de déterminer la constante diélectrique de ce dernier. Les constantes diélectriques qu'ils trouvèrent sont notablement plus grandes que celles de Boltzmann et plus grandes aussi que le carré de l'indice de réfraction [1].

En 1885, Klemenčič (27) confirma les résultats de Boltzmann; il se servait aussi d'un condensateur unique qui pouvait être placé dans les divers gaz à comparer et mesurait les capacités à l'aide d'un galvanomètre différentiel : son dispositif lui permettait de charger un grand nombre de fois par seconde le condensateur à un potentiel connu, et de faire passer les courants de décharge dans un des enroulements du galvanomètre; il ramenait l'équipage au zéro en faisant passer dans le second enroulement un courant connu. La répétition des charges lui permettait l'emploi d'un condensateur de plus faible capacité que celui de Boltzmann et d'une différence de potentiel moins élevée; les erreurs dues aux fuites étaient ainsi beaucoup réduites. Les résultats qu'il trouva, pour les gaz, sont par-

---

[1] *Cf*, note [2], p. 32.

faitement d'accord avec ceux qu'indique la loi de Maxwell; pour les vapeurs, l'accord est moins satisfaisant.

La constante diélectrique des vapeurs fut l'objet d'une étude très soignée de Lebedew (30) en 1881. Comme Ayrton et Perry, il utilisa deux condensateurs, l'un invariable, auquel il compara l'autre qui pouvait recevoir divers diélectriques; il eut recours à une méthode de comparaison indiquée par Hopkinson (24); les armatures internes des deux condensateurs communiquaient toutes deux avec un électromètre; il les réunissait à la terre pendant qu'il portait les armatures externes à des potentiels $+V_1$ et $-V_2$; puis, les armatures internes étant isolées, il réunissait les armatures externes au sol. L'électromètre déviait, à moins, toutefois, que V_1 et V_2 n'aient été choisis en raison inverse des capacités qu'ils servaient à charger. De la comparaison de V_1 et V_2 on déduisait celle des capacités. Lebedew a opéré au-dessus de 100° sur des vapeurs de corps liquides dans les conditions ordinaires, eau, alcool, benzol, éther, etc., et il rapportait leurs constantes diélectriques trouvées à la constante diélectrique de l'air pris dans les mêmes conditions de température et de pression.

De ces résultats on peut tirer une conclusion, c'est que la loi de Maxwell ne se vérifie pas, en général, au voisinage de la température d'ébullition; et que, lorsqu'elle ne se vérifie pas pour le liquide, elle ne se vérifie pas non plus pour la vapeur.

Dès 1850, Mossotti (37) avait transporté, dans le domaine des diélectriques, la théorie du magnétisme de Poisson; et, en 1879, Clausius (8) tira de cette théorie de la polarisation une conséquence intéressante : si K désigne la constante diélectrique d'un corps, d sa densité, d'après Clausius, la quantité

$$\frac{K-1}{K+2}\times\frac{1}{d}$$

doit être constante, quelles que soient les conditions dans lesquelles le corps se trouve placé (¹).

Dans le cas des gaz, K étant très voisin de 1, le dénominateur est très sensiblement égal à 3 et l'on est conduit à la relation

$$\frac{K-1}{d} = \text{const.}$$

Dans le cas où $K = n^2$ (n indice de réfraction) on retrouve la formule connue de Newton et de Laplace, et la formule de Clausius devient

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \times \frac{1}{d} = \text{const.}$$

En 1880, Lorentz (32) et Lorenz (33) ont établi cette relation indépendamment l'un de l'autre.

Les expériences précédentes ont conduit à une vérification satisfaisante de ces lois pour les gaz pris à température constante, la pression variant de 76^{cm} à des pressions de quelques millimètres de mercure; pour les vapeurs, l'accord est moins bon; la formule de Clausius permet cependant, d'après Lebedew, de relier empiriquement la densité et la constante diélectrique.

Nernst avait indiqué en 1893 la méthode du pont de Wheatstone pour la comparaison des capacités. En 1901, B¨deker (4) entreprit par cette méthode des recherches relatives à l'influence de la température sur la constante diélectrique des vapeurs. Il s'attendait à vérifier que le pouvoir inducteur varie en raison inverse du binome de dilatation $1 + \alpha t$; ses espérances furent déçues, mais il a pu, dans plusieurs cas, représenter ses résultats par une formule empirique.

Je mentionnerai encore les expériences de Linde (31), qui, en 1893, avait déterminé les constantes diélectriques

(¹) *Voir* page 97.

de divers gaz liquéfiés. Il avait d'abord utilisé une méthode indiquée par Helmholtz (22), et qui consistait à étudier le régime des oscillations dans le circuit secondaire d'une bobine de Ruhmkorff, comprenant un condensateur dont on faisait varier le diélectrique. Ce diélectrique était précisément le gaz liquéfié à étudier; Linde ne put opérer que sur l'anhydride carbonique et le protoxyde d'azote; l'anhydride sulfureux et le gaz ammoniac liquides, trop conducteurs, empêchaient les oscillations. Il eut recours alors à la méthode de Nernst, qui venait d'être publiée. Il se proposait de chercher dans quelle mesure la formule de Mossotti-Clausius s'appliquait à un corps sous un état déterminé et aussi lorsqu'on le fait passer de l'état liquide à l'état gazeux. Ses résultats ont pleinement confirmé ceux de Lebedew lorsque la loi de Maxwell est vérifiée, la formule de Lorentz-Lorenz se trouve être exacte et, par suite, celle de Mossotti-Clausius; mais, notamment pour le gaz carbonique, il a constaté de grands écarts entre les constantes mesurées jusqu'à 17°,5 et celles qu'il calcule à partir de la mesure faite à 0°. Il attribue ces écarts au fait que le gaz se trouve au voisinage du point critique, en regrettant que les difficultés expérimentales ne lui permissent pas d'en approcher davantage.

C'est encore par la méthode de Nernst que, en 1902, Eversheim (12) détermina la constante diélectrique de l'anhydride sulfureux liquide, jusqu'à la température critique de 154°; le corps en étude était contenu dans un récipient de verre enveloppé d'une gaine d'acier. Comme Nernst l'avait trouvé pour le gaz carbonique, il constata que, pour l'anhydride sulfureux liquide, la quantité

$$\frac{K-1}{K+2}\times\frac{1}{d}$$

n'est pas constante.

En résumé, dans presque toutes les expériences, les

mesures ont été faites par des méthodes *statiques* ou quasi-statiques : les temps de charge des condensateurs, bien que très courts, étaient encore extrêmement grands auprès de ceux qu'on sait réaliser depuis Hertz. Seul Linde a employé une méthode dans laquelle le corps étudié était soumis à des oscillations; il a dû l'abandonner lorsque le corps étudié était tant soit peu conducteur.

Les méthodes qu'on pourrait appeler *mécaniques*, dans lesquelles on déduit la constante diélectrique de la mesure d'attraction ou de répulsion, n'ont pas été, à ma connaissance, utilisées pour les gaz.

Il en est de même de la méthode d'*oscillations* sous la forme si pratique que lui a donnée Drude (10) pour l'étude des diélectriques liquides.

Les résultats se bornent à une vérification assez satisfaisante en général de la loi de Maxwell; tant qu'il s'agit de gaz éloignés des conditions de liquéfaction, le rapport $\frac{K-1}{d}$ est à peu près constant à température fixe et pour des écarts de pression de 760 à quelques millimètres de mercure. La formule de Mossotti-Clausius se trouve aussi vérifiée.

Mais lorsqu'on approche des conditions de liquéfaction, la courbe représentant la constante diélectrique en fonction de la température ou de la pression a une allure souvent imprévue; au voisinage du point critique même, point sur lequel tous les renseignements font défaut au point de vue électrique, toutes les propriétés physiques du corps varient d'une façon continue. Il est vraisemblable qu'il en est de même de la constante diélectrique.

Je me suis donc proposé de compléter les résultats acquis par une étude de la constante diélectrique des gaz à pression et température variables, d'abord loin

du point critique, ensuite au voisinage immédiat du point critique en faisant des mesures, à la fois sur le liquide et sur sa vapeur saturante.

J'ai pu exécuter la première partie de ce programme en employant une méthode statique dérivée de celle de Lebedew. Les gaz que j'ai choisis ont été d'abord l'air, qui appartient à la catégorie des gaz dits *permanents*, puis l'anhydride carbonique, qui présente déjà à la température ordinaire, et pour des pressions de quelques atmosphères, des écarts notables avec la loi de Mariotte, enfin un gaz très facilement liquéfiable, l'anhydride sulfureux.

La conductibilité présentée par ce dernier, bien avant d'atteindre la pression de liquéfaction pour une température déterminée, m'a obligé, pour poursuivre cette étude, à opérer autrement.

Je me suis alors adressé à la méthode que Drude a proposée en 1897, pour la mesure de la constante diélectrique des liquides. En principe, il mesure le rapport des deux longueurs d'onde λ_0 et λ d'une oscillation électrique lorsque les ondes se propagent dans l'air ou dans le milieu considéré. On sait que le rapport $\frac{\lambda_0}{\lambda}$ est égal à $\sqrt{K\mu}$, μ étant la perméabilité magnétique de ce milieu; μ ne diffère de 1 que par la 5^e ou la 6^e décimale dans le cas des gaz, et l'on peut écrire

$$K = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2.$$

La méthode peut être mise en œuvre de diverses manières indiquées par l'auteur ; elle n'est guère praticable sous la forme précédente que pour les corps liquides à la température et à la pression ordinaire ; comme ce n'était pas le cas, j'ai choisi celle dans laquelle le corps en étude sert de diélectrique à un petit condensateur placé à l'extrémité de la ligne le long de laquelle se propagent

les ondes. Ce condensateur était disposé dans un tube de verre de façon à être baigné soit par le gaz liquéfié, soit par sa vapeur; le tube contenant le condensateur était un tube de Natterer, et le gaz que j'ai pu étudier, l'anhydride carbonique; parmi les rares corps qui joignent à l'avantage d'une pression critique peu élevée celui d'une température facilement accessible, il est particulièrement intéressant parce qu'il a été déjà l'objet d'études nombreuses à beaucoup d'autres points de vue. Il m'a été possible de suivre la constante diélectrique de ce corps au passage par le point critique en mesurant pour diverses températures la constante du liquide et celle du gaz.

L'exposé de ce travail comprend trois Parties : la première a trait aux mesures faites par la méthode statique; les expériences faites par la méthode de Drude sur l'anhydride carbonique au voisinage du point critique font l'objet de la seconde Partie. Dans chacun de ces Chapitres, j'ai d'abord exposé le principe de la méthode, puis décrit les appareils utilisés; j'ai ensuite indiqué le réglage de ces appareils, la marche d'une expérience, les résultats obtenus et la précision sur laquelle on est en droit de compter. Dans la troisième Partie, j'ai rapproché de mes nombres ceux qui avaient été trouvés par les expérimentateurs qui se sont occupés de la question avant moi; j'ai ensuite cherché à reconnaître jusqu'à quel point mes résultats étaient d'accord avec les diverses formules qui relient les propriétés physiques des corps, et quelle confirmation je pouvais apporter aux hypothèses qui leur servent de base.

Ces recherches ont été exécutées à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy, dans le laboratoire de M. Rothé. Je lui dois, ainsi qu'à M. Gutton, de vifs remercîments pour les nombreux conseils et encouragements qu'ils ont bien voulu me donner; je suis heureux

de les assurer tous deux de ma sincère et respectueuse reconnaissance.

Qu'il me soit permis, au moment de quitter la Faculté des Sciences de Nancy, à laquelle je demeure profondément attaché, de rappeler le souvenir des premières années que j'y ai passées, quand je suivais les cours de maîtres vénérés comme M. Bichat, dont nous conservons pieusement la mémoire, et M. Blondlot, à qui j'exprime aujourd'hui l'assurance de mon profond respect; qu'il me soit permis enfin de remercier tous les maîtres, collègues et amis que je quitte, pour l'accueil si cordial que j'ai toujours trouvé auprès d'eux.

J'ai contracté une dette toute particulière de reconnaissance envers mon ami, M. le Dr M. Dufour, professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Nancy, qui, après avoir guidé mes premiers pas dans les laboratoires de la Faculté des Sciences, m'a prodigué au cours de ce travail une aide empressée. Je lui dis : Merci.

Merci aussi bien cordialement à mon vieil ami, P. Ferry, préparateur à la Faculté des Sciences de Nancy, dont j'ai tant de fois mis à contribution la grande habileté et l'inlassable complaisance.

PREMIÈRE PARTIE.

Constantes diélectriques de l'air, de l'anhydride carbonique et de l'anhydride sulfureux.

La méthode que j'ai employée consiste à comparer successivement les capacités C_V et C_G d'un condensateur cylindrique d'abord vide, puis rempli du gaz à étudier, à celle d'un condensateur invariable C'. Le rapport $\frac{C_G}{C_V}$ représente la constante diélectrique du gaz dans les conditions où il se trouvait.

La comparaison des capacités se fait, pour chacun des états du condensateur C, par une méthode électrostatique.

Les deux condensateurs ayant une armature réunie au sol, l'armature interne, par exemple, on cherche à quels potentiels V et V′, l'un positif, et l'autre négatif, il faut charger les armatures externes pour que, en les réunissant, on ne constate plus aucune charge.

Il faut donc intercaler un appareil indicateur (*fig.* 1); je me suis servi d'un électromètre à quadrants E dont une paire de quadrants Q_1 est maintenue en permanence en communication avec le sol, l'aiguille étant portée à un potentiel assez élevé au-dessus de celui du sol; l'autre paire de quadrants Q est réunie aux armatures internes [1] des deux condensateurs. Elle est d'abord mise au sol pendant qu'on porte les armatures externes respectivement aux potentiels V et — V′; puis on coupe la communication de Q avec le sol, et l'on réunit au sol les armatures externes. Les charges retenues par influence sur les armatures internes sont libérées, et, si elles sont égales, l'aiguille de l'électromètre ne dévie pas. Dans ce cas, on a

$$(1) \qquad C'V' = CV \qquad \text{ou} \qquad \frac{C'}{C} = \frac{V}{V'}.$$

Les capacités sont en raison inverse des potentiels auxquels on a dû les charger.

On cherche, par tâtonnements les potentiels convenables lorsque le condensateur C contient du gaz dans certaines conditions, puis lorsqu'il est vide. Dans les deux réglages, on conserve la même valeur à V, par exemple; on est alors obligé de donner à V′ les valeurs V'_{vide}

[1] *Voir* plus loin, page 28, la raison de ce choix. Les armatures internes étant en communication constante avec une paire de quadrants de l'électromètre, j'emploierai indifféremment les expressions électromètre ou armatures internes pour désigner le conducteur constitué par leur ensemble.

et V'_{gaz} et l'on a

$$\frac{C'}{C_{vide}} = \frac{V}{V'_{vide}} \qquad \text{et} \qquad \frac{C'}{C_{gaz}} = \frac{V}{V'_{gaz}},$$

d'où la valeur de constante diélectrique du gaz, dans les conditions où il se trouvait

$$(2) \qquad K = \frac{C_{gaz}}{C_{vide}} = \frac{V'_{gaz}}{V} \times C' \times \frac{V}{V'_{vide} \times C'} = \frac{V'_{gaz}}{V'_{vide}}.$$

En réalité, on ne peut pas aller jusqu'au vide complet dans le condensateur d'étude; d'ailleurs, pour des pressions très faibles, le gaz deviendrait conducteur et la méthode ne serait plus applicable. Mais il est possible de suivre les variations de la capacité C lorsqu'on fait varier l'état du gaz qu'elle contient (sa température et sa pression) ainsi que sa nature.

Cette méthode est analogue à celle qui a été employée par Lebedew pour déterminer des constantes diélectriques de vapeurs; mais j'ai apporté à son dispositif un perfectionnement essentiel. Lebedew utilisait, pour produire les différences de potentiel V et V', deux batteries d'accumulateurs; à l'une d'elles, il ajoutait, pour compenser les variations de capacité du condensateur d'étude, une différence de potentiel prise sur une résistance parcourue par un courant continu. Mais il était obligé, pour s'affranchir des variations de force électromotrice des accumulateurs, de faire des mesures en intervertissant les polarités, puis en substituant les batteries l'une à l'autre.

Pour éviter ces inconvénients, j'ai préféré produire les différences de potentiel nécessaires par le passage d'un courant continu dans deux résistances R et R' mises en série avec une source S (*fig.* 2). Le point de jonction des deux résistances est réuni d'une façon permanente au sol. Si l'on désigne par i le courant qui passe dans ce circuit,

l'on a, en valeurs absolues,

$$V = Ri \qquad \text{et} \qquad V' = R'i,$$

d'où

$$\frac{V}{V'} = \frac{R}{R'};$$

ce rapport est indépendant de la force électromotrice de la source. De plus, on sait que parmi les grandeurs dont on

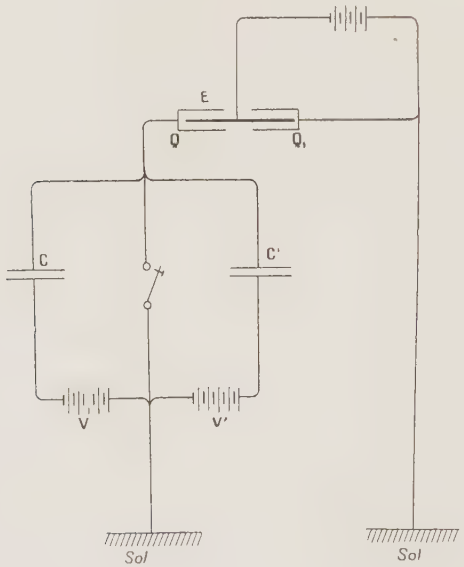

Fig. 1.

s'occupe en électricité, c'est aux résistances qu'on peut donner avec le plus de précision une valeur déterminée toujours comparable à elle-même; j'avais donc intérêt à substituer au rapport de deux forces électromotrices, sujettes à varier, celui de deux résistances.

Par le dispositif même, les sens des deux différences de potentiel réalisées sont bien tels que l'un des condensateurs se trouve chargé dans un sens, tandis que l'autre l'est en sens inverse.

Enfin, il suffisait de couper le courant i par l'interrupteur I pour que, automatiquement, les armatures externes des condensateurs se trouvassent réunies entre elles et en communication avec le sol.

La formule (2) devient alors

$$K = \frac{C_{gaz}}{C_{vide}} = \frac{R'_{gaz}}{R'_{vide}}, \tag{3}$$

R'_{vide} et R'_{gaz} étant les valeurs qu'il faut donner à R′ pour obtenir l'immobilité de l'électromètre lorsqu'on fait l'expérience avec le condensateur d'étude rempli de gaz, puis vide. Pendant ces opérations, R et C′ doivent conserver des valeurs invariables, qu'il n'est d'ailleurs pas nécessaire de connaître.

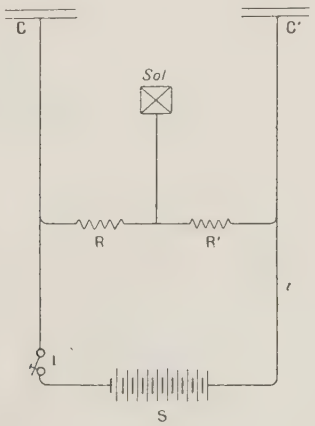

Fig. 2.

Je montrerai plus loin comment il est possible d'interpréter les résultats pour avoir K avec une précision suffisante.

Description des appareils. — Le condensateur à gaz et le condensateur invariable sont à peu près identiques.

Pour obtenir à la fois une capacité assez grande, qui permette d'atteindre plus de précision dans les mesures et une grande facilité de construction, je leur ai donné la forme cylindrique. Ces condensateurs consistaient chacun en un tube de laiton de 50^{cm} de long, $3^{cm},1$ de diamètre extérieur et $0^{mm},5$ d'épaisseur, centré dans un second tube de laiton de même longueur, de $3^{cm},3$ de diamètre intérieur et de $0^{mm},5$ d'épaisseur. Les armatures étaient maintenues isolées l'une de l'autre par trois supports en ambroïde placés à 120° l'un de l'autre. Ces supports avaient été taillés dans un cylindre d'ambroïde suivant la forme indiquée par la figure 3. Le centrage

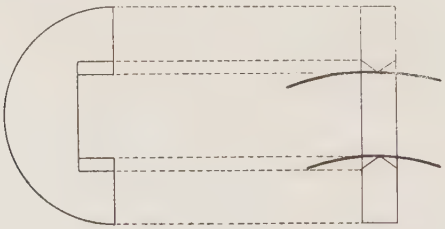

Fig. 3.

des tubes était extrêmement facile, et le contact des armatures avec les supports réduit au minimum; j'évitais ainsi les perturbations dues aux fuites ou aux résidus de charge sur les parties de diélectrique solide. Ensuite, la partie de la surface des armatures en contact avec le diélectrique solide constituait une capacité invariable montée en batterie avec celle qu'on étudiait, et il fallait la rendre aussi faible que possible; cette surface n'atteignait certainement pas 6^{mm^2} (3 cales de 1^{mm^2} à chaque extrémité); or la surface du condensateur était de

$$\pi \times 32 \times 500 = 50\,300^{mm^2}.$$

Dans les mesures effectuées sur l'anhydride sulfureux, j'ai reconnu que ce gaz attaquait l'ambroïde en le ren-

dant conducteur, et j'ai dû le remplacer par de petites cales en quartz insérées dans l'espace annulaire entre les deux cylindres. Pour avoir un isolement meilleur, je me suis arrangé de façon que l'axe du cristal, dans lequel était prise la cale, coïncide avec un des rayons du cylindre. C'est, d'après la plupart des auteurs, le sens dans lequel le quartz présente la conductibilité la plus faible. L'isolement ainsi obtenu était excellent.

La surface de contact de ces cales de quartz, qui ne touchaient les armatures que par des pointes, était bien inférieure à celle des supports en ambroïde. Dans le cas de ces dernières, leur constante diélectrique étant considérable vis-à-vis celle du gaz, il est bon de se rendre compte de leur influence.

Soient S la surface libre des armatures, s celle qui est recouverte par l'isolant de constante diélectrique K_i, celle du gaz étant K, c la capacité de l'unité de surface du condensateur dans l'hypothèse d'un champ uniforme entre les armatures. On a

$$C_{vide} = Sc + K_i sc,$$
$$C_{gaz} = ScK + K_i sc;$$

d'où l'on tire

$$K = \frac{C_{gaz} - K_i sc}{V_{vide} - K_i sc}.$$

En ne faisant pas de correction, on prendrait

$$K' = \frac{C_{gaz}}{C_{vide}},$$

valeur plus petite que la valeur vraie; on commet donc une erreur par défaut.

L'erreur relative sur $(K - 1)$ est facile à calculer; elle a pour valeur $K\frac{s}{S}$, elle est donc absolument insignifiante.

Le condensateur invariable était placé sur deux cales de paraffine dans un cylindre de zinc de 7^{cm} de diamètre réuni au sol; ce cylindre était fermé aux deux extrémités par un couvercle également en zinc percé d'un trou pour laisser passage à travers un bouchon de paraffine aux fils de communication allant aux armatures.

Le condensateur à gaz reposait sur deux cales d'ébonite, dont la forme est indiquée par la figure 4, à l'intérieur

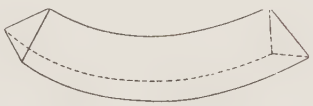

Fig. 4.

d'un cylindre de laiton T (*fig.* 5) de 6^{cm} de diamètre intérieur, 1^{mm} d'épaisseur et 55^{cm} de longueur. Aux deux extrémités de ce cylindre, avaient été rapportées et soudées deux flasques de laiton de 6^{mm}, sur lesquelles étaient serrés deux disques de même métal avec interposition d'un joint de plomb. Au centre de ces disques, était percé un trou dans lequel était vissé et mastiqué un bouchon d'ébonite, à travers lequel passaient les fils de communication. Le tube de laiton était également réuni au sol.

Pour faire varier la température du gaz étudié, je chauffais uniformément le tube qui le contenait; à cet effet, ce tube était recouvert sur toute sa longueur d'un enroulement isolé de fil de maillechort de $0^{mm},8$ de diamètre, dans lequel je faisais passer le courant d'une batterie d'accumulateurs. Il était de plus protégé contre le refroidissement à l'aide d'une couche de feutre épais séparée du maillechort par un carton d'amiante.

La température était mesurée à l'aide d'un couple

thermo-électrique fer-constantan fermé sur un galvanomètre Deprez-d'Arsonval de 200 ohms de résistance, avec bobinage en maillechort pour assurer la constance de l'étalonnage malgré les variations de température. Une des soudures était placée dans la glace fondante; l'autre disposée dans le tube, aussi près que possible du condensateur et à l'intérieur. En raison de la faible masse de gaz en contact avec le métal bon conducteur, j'estimais que tout l'intérieur du tube était à la température indiquée par le dispositif thermo-électrique lorsque l'indication était constante.

Pour les températures les plus basses que j'ai atteintes, les expériences ayant lieu en hiver, j'ai utilisé le refroidissement naturel en ouvrant une fenêtre située très près du tube à refroidir, qui était alors dépouillé de son enveloppe de feutre.

Le gaz était amené dans l'enceinte close par une tubulure latérale qui pouvait être mise en relation par un robinet à trois voies r, soit avec une pompe de compression introduisant le gaz à étudier [1], soit avec une pompe à vide. Entre le tube de laiton et le robinet à trois voies était branché un tube communiquant avec deux manomètres, l'un métallique donnant des indications très grossières, l'autre à mercure, à air libre, suivant le dispositif de Regnault (45). Le tube ouvert et le tube fermé du manomètre à air libre avaient 10^{mm} de diamètre intérieur, ce qui évitait toute correction relative aux phénomènes capillaires. Le tube fermé avait $1^{m},30$ de hauteur; le tube ouvert, $4^{m},35$; il était donc possible de mesurer des pressions jusque $5^{atm},5$. Les différences de niveau étaient lues au millimètre sur une règle en bois

[1] Dans le cas de l'anhydride carbonique ou de l'anhydride sulfureux, le gaz était amené sous pression d'une bombe ou d'un siphon du corps liquéfié.

de 4^m suspendue au plafond entre les deux tubes, son zéro était en haut; pour les dénivellations supérieures à 4^m, je prolongeais la règle par une petite règle divisée de 50^{cm} de longueur.

Soient H_0 la hauteur barométrique, H_1 la lecture faite

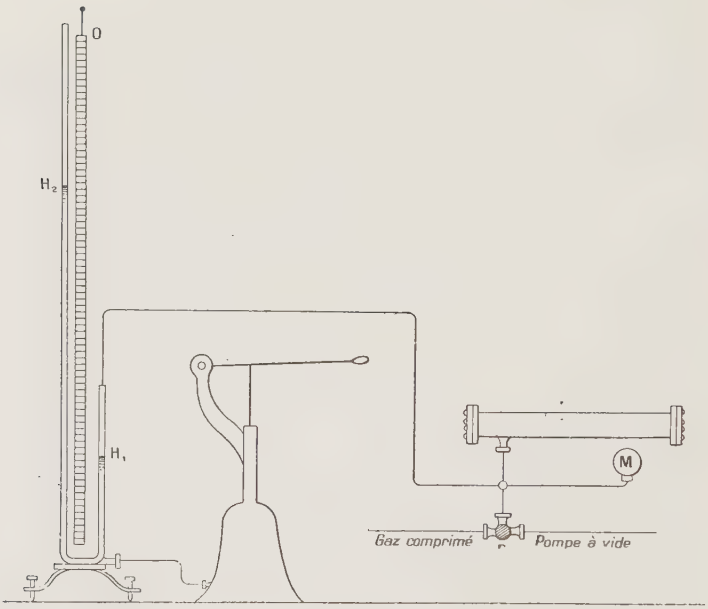

Fig. 5.

en face du ménisque dans la branche ouverte, H_2 du côté de la branche fermée, la pression du gaz dans le récipient était mesurée par

$$H_0 + H_1 - H_2 \text{ millimètres de mercure.}$$

La température de la salle d'expérience a varié au maximum de 3°; en comptant sur un coefficient de dilatation du mercure de 0,00018, on voit qu'il est inutile

d'introduire une correction des pressions en raison de sa variation de densité (¹).

J'ai expérimenté sur trois gaz qui présentent des propriétés assez différentes dans les conditions dans lesquelles il m'était permis d'opérer : l'air, parce qu'il fait partie des gaz dits *permanents*, et se trouve très loin de ses conditions de liquéfaction; l'anhydride carbonique, parce qu'il s'écarte déjà, comme on le sait, très notablement de la loi de Mariotte; et enfin, l'anhydride sulfureux, parce qu'il est très facilement liquéfiable aux températures et aux pressions qui m'étaient accessibles.

L'air était pris hors du laboratoire, et traversait, avant d'être refoulé dans l'appareil à l'aide d'une pompe, un long tube rempli de fragments de potasse, puis une série de tubes remplis de ponce sulfurique et, enfin, du coton destiné à arrêter les poussières. Entre ce dernier tube et la pompe était interposé un flacon de 20^{l}, dans lequel la pompe puisait, de façon à régulariser l'aspiration de l'air dans les tubes purificateurs.

Tous les robinets placés sur le trajet, ainsi que la pompe, étaient graissés avec une quantité aussi faible que possible d'un mélange de vaseline et de lanoline. J'ai vérifié que l'air ainsi obtenu était pur et qu'il n'y avait pas de matières organiques entraînées par les gaz au contact de la graisse; à cet effet, l'air sortant de l'appareil s'écoulait doucement à travers un tube de platine porté au rouge dans la flamme d'un brûleur de Bunsen, puis barbotait dans un tube de Liebig rempli d'eau de baryte.

(¹) Dans le cas des pressions élevées, il fallait introduire du mercure dans l'appareil; dans ce but, une tubulure placée sur le raccord horizontal des deux branches du manomètre recevait du mercure d'un récipient en fonte, dans lequel une petite pompe aspirante et foulante permettait d'introduire de la glycérine sous pression.

S'il y avait eu des matières organiques, elles auraient été transformées en anhydride carbonique. Après avoir fait passer dix fois dans l'appareil le gaz contenu dans le tube T sous la pression de 5^{atm}, l'eau de baryte est restée parfaitement limpide. La privation de CO^2 par la potasse était donc suffisante et, s'il y avait des matières organiques entraînées, ce n'était qu'à l'état de traces insignifiantes (1).

L'anhydride carbonique que j'ai utilisé était puisé dans une bombe du commerce B. J'avais choisi dans un certain nombre de bombes que j'avais à ma disposition celle qui donnait le CO^2 le plus pur, en comparant les résidus laissés par 200^{cm^3} du gaz à la pression atmosphérique après absorption par la potasse (2); pour la bombe choisie, le résidu ne dépassait pas $\frac{3}{4}$ de centimètre cube ramenés à la pression du début, sans purification préalable. Le résidu était, en majeure partie, de l'oxyde de carbone, ainsi que j'ai pu m'en assurer en l'absorbant à peu près totalement par du chlorure cuivreux en solution chlorhydrique. Il y avait de plus à éliminer la vapeur d'eau qui peut se trouver dans le gaz; j'ai donc fabriqué un appareil purificateur P permettant d'opérer sous pression sans danger : j'ai enfermé dans un tube de laiton à parois

(1) On peut objecter que, au rouge, le tube de platine est poreux et se laisse traverser par les gaz sous pression; il n'en est certainement parti qu'une très faible quantité, la pression nécessaire pour traverser le tube de Liebig étant très faible. D'autre part, si du gaz s'est échappé par la paroi du tube de platine, il était moins riche en CO^2 que celui qui traversait normalement le tube, l'anhydride carbonique ayant une densité plus grande que les autres gaz de l'air.

(2) J'ai reconnu à ce propos que les bombes presque vides donnent un gaz incomparablement plus pur que celles qui sont pleines; il est d'ailleurs facile de s'en rendre compte : la plus grande partie des gaz non liquéfiés a été entraînée par le gaz qu'on a extrait de la bombe.

épaisses de 1^{mm} et de 2^{cm} de diamètre intérieur un tube de verre de $1^{m},50$ de long, de diamètre aussi grand que possible. Sur une longueur de 50^{cm} environ, le tube contenait du chlorure cuivreux divisé par de la pierre ponce; puis, sur une longueur de 10^{cm}, de ponce sèche et le reste du tube était rempli de ponce sulfurique.

Le tube t_1, venant du robinet à pointeau p de la bombe, était mastiqué dans le bouchon fermant le tube de verre

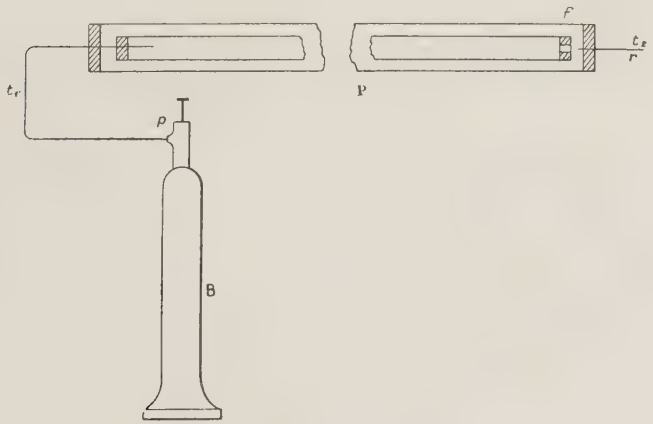

Fig. 6.

du côté chlorure cuivreux; de plus, une bague de laiton était soudée à la fois sur t_1 et sur le tube P. A l'autre extrémité, le tube de verre était simplement fermé par un bouchon percé de trous, et un tube t était soudé sur P par une bague de raccord. Grâce à ce dispositif, le gaz sortant de la bombe sous pression traversait le tube à ponce et sortait en f; mais, dans tout l'espace compris entre le tube de verre et le tube de laiton, la pression était sensiblement la même que dans le tube de verre, et il n'y avait pas à craindre d'éclatement de ce dernier.

Le tube t était raccordé au robinet à trois voies, comme il a été indiqué page 19.

L'appareil construit, j'ai vérifié que le gaz obtenu était suffisamment pur; après en avoir recueilli 200^{cm^3} sur la cuve à eau, j'ai introduit de la potasse dans le liquide pour absorber tout le CO^2; le résidu gazeux ramené à la pression atmosphérique occupait un volume évalué à 10^{mm^3} au maximum, ce qui correspond à $\frac{1}{20000}$ d'impureté. Je me suis assuré également que la quantité de vapeur d'eau qui restait dans le gaz était insignifiante en le faisant passer dans un tube à ponce sulfurique taré. Après avoir fait passer environ 10^l de gaz, soit un poids de 15^g, l'augmentation de poids du tube n'atteignait pas $0^{mg},5$.

L'anhydride sulfureux que j'ai utilisé était également le corps préparé industriellement; mais je lui faisais subir une purification préalable. J'ai commencé par distiller le liquide en réunissant le siphon plein à un siphon vide par un tube de cuivre. Le siphon vide était placé dans un mélange de glace et de sel, tandis que l'autre restait à la température de la salle (15°). En ouvrant progressivement les robinets à pointeau des deux siphons, je faisais distiller le liquide dans le siphon refroidi. J'ai rejeté les premier et dernier tiers du liquide obtenu pour ne conserver que ce qui avait passé dans la partie moyenne de l'opération.

Le siphon contenant le gaz qui devait servir aux expériences était réuni au robinet à trois voies par l'intermédiaire d'un tube de ponce sulfurique entouré d'un tube de laiton, suivant le dispositif qui a été indiqué ci-dessus. J'ai vérifié à la sortie que le gaz était absorbable par la potasse avec un résidu qui n'atteignait pas 0,001 pour 100, et qui était probablement constitué par des gaz de l'air.

L'électromètre utilisé dans les premières expériences était un électromètre à quadrants, modèle de Mascart, légèrement modifié : j'avais remplacé l'aiguille en platine trop lourde, par une aiguille en clinquant d'aluminium

très légère, ayant la forme de deux quarts de cercle opposés par le centre. Elle était suspendue à un fil de platine de 30^{cm} de longueur et de $\frac{1}{50}$ de millimètre de diamètre, parfaitement recuit (1). L'extrémité supérieure de ce fil était fixée en haut d'un tube de verre à une pièce métallique servant de borne pour la charge de l'aiguille.

Un petit miroir porté par l'équipage mobile permettait de viser, à l'aide d'une lunette munie d'un réticule, une échelle divisée, placée à $2^{m},50$ du miroir. L'amortissement de cet appareil était très faible, et j'ai dû le remplacer par le modèle de Curie : l'aiguille, extrêmement légère, oscille entre des plateaux très rapprochés, et ses oscillations étaient presque complètement amorties.

Dans la méthode que j'ai décrite, l'électromètre sert d'appareil de zéro pour mesurer, non pas des potentiels, mais des charges. Dans ces conditions, la capacité réunie à la paire de quadrants qui reçoit la charge étant fixe, la sensibilité passe par un maximum, lorsqu'on fait croître le potentiel de l'aiguille. J'ai vérifié, pour le second électromètre, que ce maximum est atteint au voisinage de 200-220 volts. A partir de 150-160 volts, la fixité du zéro de l'appareil décroît rapidement. J'ai donc chargé en permanence mon aiguille à 150 volts. Cette tension était obtenue à l'aide d'une petite batterie d'accumulateurs de 75 éléments de 0,25 ampère-heure de capacité, en série (éléments Butaud).

Les appareils que je viens de décrire étaient montés suivant le schéma de la figure 7. Toutes les parties du circuit qui n'étaient pas réunies à la terre directement ou par l'intermédiaire de résistances, étaient protégées contre les phénomènes d'influence dus à des corps exté-

(1) Un tel fil, à l'air libre, peut sans danger être placé sous une tension de 220 volts. Après cette opération, le zéro de l'appareil est extrêmement fixe.

rieurs par des écrans métalliques réunis au sol. Les fils de communication eux-mêmes étaient tendus dans l'axe de tubes de laiton réunis au sol. Ce sont les précautions qu'il est indispensable de prendre dans toutes les mesures électrostatiques.

Les diverses manœuvres nécessaires à une expérience, étaient effectuées automatiquement par un levier L (*fig.* 7)

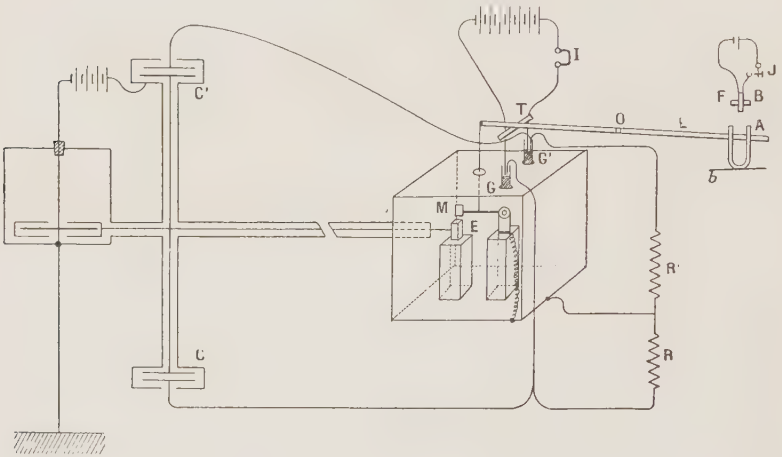

Fig. 7. — La partie gauche de la figure est en coupe, la partie droite une perspective. Le levier est figuré dans la position 2.

tournant autour d'un axe O. Il portait un aimant en U, A, qui pouvait être retenu par une armature en fer doux F placée au-dessus de lui; je désignerai cette position du levier par le n° 1. L'armature F portait une petite bobine B, dans laquelle on pouvait envoyer le courant d'un accumulateur en fermant l'interrupteur J. Le sens du courant était choisi de façon à créer des ampères-tours en sens inverse de la force magnéto-motrice de l'aimant. L'attraction cessait et l'aimant tombait jusqu'à un butoir *b*, amenant ainsi le levier à une position n° 2. Lorsque le levier est dans la position 1, il laisse reposer sur une petite enclume en laiton E, isolée

mais réunie aux armatures internes et à l'électromètre, un petit marteau M en communication avec le sol; le dispositif est placé à l'intérieur d'une caisse en zinc, réunie au sol, sur le couvercle de laquelle sont isolés deux godets de mercure où plongent deux fils de platine montés sur une traverse en ébonite, et réunis aux deux pôles de la pile. Sur le trajet d'un des fils est placé un interrupteur I, à portée de la main de l'opérateur. Les masses de mercure des godets G et G′ sont réunies comme l'indique la figure 7, respectivement aux armatures externes des condensateurs et aux résistances R et R′ mises en série par le sol. Une faible fraction de R, sur laquelle se feront les réglages, est également mise sous la main de l'opérateur. Le levier étant dans la position 1, tant que I n'est pas fermé, tout l'appareil est au sol; l'électromètre indique son zéro (1). Si l'on ferme I, on porte les armatures externes des condensateurs aux potentiels V et V′ en sens inverse, et l'électromètre, toujours réuni au sol, reste au zéro; lorsqu'on ferme J, le levier passe à la position 2; pendant ce mouvement, le marteau M est d'abord soulevé; l'électromètre, avec les deux armatures internes auxquelles il est réuni, est isolé du sol, puis, aussitôt après, les fils de platine sortent du mercure; les armatures internes se trouvent réunies au sol par un fil sur lequel ne se trouve pas de force électromotrice : elles se déchargent et libèrent les quantités d'électricité qui étaient sur les armatures internes; dans le cas général, l'électromètre dévie, et c'est en agissant sur le rapport des deux résistances R et R′ qu'on peut arriver à n'avoir plus aucune déviation en recommençant l'opération.

En répétant cette manœuvre lentement, on peut s'as-

(1) Lorsque l'électromètre est convenablement réglé, cette position d'équilibre est la même que lorsque l'aiguille est au sol ainsi que tous les quadrants.

surer qu'il n'y a pas de causes d'erreur systématiques dues à des fuites des isolants ou à des phénomènes d'influence provenant de charges à proximité des pièces qui sont tantôt isolées, tantôt au sol.

1° Toutes les pièces de paraffine de l'appareil avaient été flambées, suivant le cas avant ou après leur mise en place, de façon à enlever par les gaz chauds les charges que des frottements auraient pu leur communiquer. Les cales d'ambroïde étaient lavées avec un pinceau imbibé d'alcool absolu. Dans ces conditions, l'aiguille étant chargée et les armatures internes et externes réunies au sol, l'électromètre restait immobile lorsqu'on isolait les armatures internes. Il ne déviait pas davantage si l'on introduisait du gaz dans le condensateur d'étude ou si on le laissait s'en échapper rapidement; je vérifiais ainsi que s'il y a de l'électricité produite par le frottement des gaz lors de la compression ou de la détente, elle est sans action sur la mesure.

2° L'électromètre étant au sol, je portais les armatures externes aux potentiels V et V′ et j'isolais l'électromètre : si les isolements des condensateurs avaient été parfaits, l'électromètre serait resté absolument immobile; en réalité, il déviait extrêmement lentement, à droite ou à gauche, suivant que l'un ou l'autre des condensateurs avait le meilleur isolement; il était très facile d'arriver à ce que la déviation n'atteigne pas 1 div. par minute, ce qui correspondait à une fuite insignifiante pendant la fraction de seconde nécessaire pour effectuer les manœuvres par la chute du levier.

On comprend ici l'avantage qu'il y avait à choisir les armatures internes pour les relier ensemble à l'électromètre plutôt que les armatures externes : ces dernières sont toujours réunies au sol directement ou par l'intermédiaire d'une résistance parcourue par du courant; il n'est donc pas indispensable de leur assurer un isolement

bien élevé; seul, l'isolement des deux armatures internes des condensateurs doit être excellent. Si j'avais réuni les armatures externes ensemble à l'électromètre, il aurait été extrêmement difficile de les isoler suffisamment, car il y aurait eu des fuites possibles, et par l'isolant qui les soutenait et par les cales du condensateur.

3° Je me suis assuré enfin que les parties de diélectrique solide en contact avec les armatures n'apportaient aucun trouble par les résidus de charge qu'elles pouvaient conserver; j'avais disposé sur le circuit de la pile et des résistances un inverseur qui n'est pas figuré et qui permettait, après avoir fait une expérience avec un sens de charge de la refaire avec des polarités inverses. Les résultats ont toujours été les mêmes dans la limite de la précision des mesures.

Expériences et résultats. — Avant de commencer une série de mesures, il était essentiel de s'assurer que tout le système électrique était en bon état, notamment au point de vue de l'isolement, et qu'il était possible de réaliser l'équilibre de l'électromètre en choisissant convenablement les valeurs de R et R'.

Une expérience consistait à suivre la variation de la constante diélectrique d'un gaz à température constante et pression variable. Après avoir fait le vide dans le tube T, j'y introduisais le gaz à étudier sous la pression de 5^{kg}; puis, je le vidais aussi complètement que possible, le remplissais à nouveau, etc., et recommençais cette opération une dizaine de fois pour avoir du gaz bien pur. L'appareil étant rempli définitivement à une pression de 5^{kg}, j'attendais que la température indiquée par le galvanomètre du couple thermo-électrique fût constante. Cette précaution était indispensable même dans le cas où j'opérais à une température égale à la température ambiante, la compression du gaz ayant pu l'échauffer. J'étais absolu-

ment certain que la température indiquée était vraiment celle du gaz, lorsque le réglage des résistances R et R′ restant constant pendant 5 minutes indiquait que la constante diélectrique du corps contenu dans T était fixe.

Puis, je détendais doucement le gaz, et recommençais le même réglage pour des pressions de plus en plus faibles mesurées au manomètre à mercure. La capacité C devenant de plus en plus petite, pour rétablir le réglage, il fallait réduire le rapport $\frac{R'}{R}$. J'agissais sur R′ seulement, en conservant à R une valeur fixe; par des tâtonnements préliminaires, j'avais donné à R une valeur telle que R′ soit sensiblement égale à 100 000 ohms lorsque le tube T était vide. Ce mode d'opérer, indépendamment de la très grande commodité qu'il présente, avait au point de vue de la précision un énorme avantage : en passant d'un réglage à l'autre, je n'avais pas à déboucher de résistances importantes, et l'erreur relative sur (K — 1) était la même que celle qu'on commettait sur le nombre d'ohms débouchés au second réglage. Je notais les valeurs de R′ pour chaque valeur de la pression.

Je donne, dans le Tableau I ci-dessous, les nombres relevés au cours d'une expérience sur l'air.

Tableau I.

H_1.	$H_0 + H_1$.	H_2.	H.	R′.	R.
2786	3531	3461	70	100015	94800
2943	3688	3036	652	100050	»
3056	3801	2394	1407	100113,5	»
2834	3579	1345	2234	100172	»
3060	3805	711	3094	100233	»
3458	4203	317	3886	100289	»
3887	4632	— 120	4752	100352	»
3431	4176	532	3644	100272	»
3558	4303	2135	2168	100165	»
			745	100065	»
2805	3550	3485	65	100015	»

H_1.	H_0+H_1.	H_2.	H.	R'.	R.
3083	3828	2928	900	100075	94800
3419	4164	1986	2178	100165	»
3380	4125	600	3525	100259	»
3945	4690	— 115	4805	100363	»
3915	4660	— 35	4695	100343	»
3502	4247	541	3706	100266	»
3729	4473	2325	2148	100156	»
			745	100062,5	»
2815	3560	3494	66	100008	»

avec

$$H = H_0 + H_1 - H_2, \qquad H_0 = 745^{mm}, \qquad t = 17°.$$

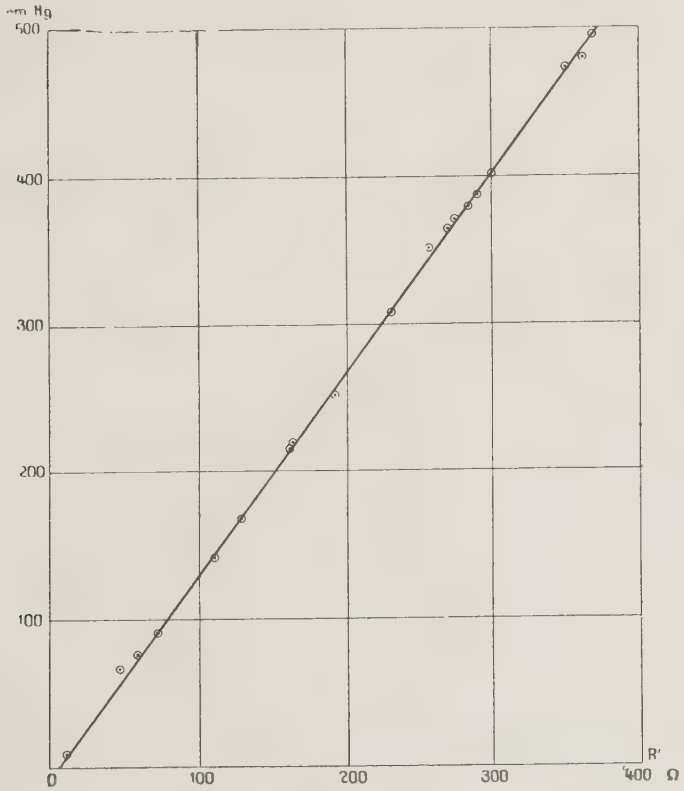

Fig. 8.

Si l'on porte en abscisses les valeurs de R′ et en ordonnées les valeurs de la pression en centimètres de mercure, on obtient la figure 8; tous les points se placent sur une droite; je montrerai plus loin (1) les conclusions qu'on peut tirer de cette relation linéaire.

Dans une série d'expériences faites avec une pompe plus parfaite que celle qui me servait dans les opérations courantes, j'ai pu, après avoir mis tous les joints en parfait état, descendre jusqu'à une pression de 3^{mm} de mercure; les pressions étaient lues sur un petit manomètre en U analogue à ceux qui sont utilisés dans les machines pneumatiques. Les points obtenus se placent parfaitement sur la droite tracée primitivement.

Les résultats sont analogues pour toutes les températures auxquelles j'ai pu opérer comprises entre 9° et 70°.

Sur la droite que j'ai tracée, je peux déterminer les valeurs R'_{gaz} et R'_{vide} qu'il a fallu donner à R′ pour obtenir l'immobilité de l'électromètre lorsque l'appareil contient de l'air à une pression de 76^{cm} de mercure, par exemple, puis lorsqu'on y a fait le vide. La constante diélectrique de l'air, dans les conditions où il était, est

$$K = \frac{R'_{gaz}}{R'_{vide}}.$$

Précision obtenue dans les mesures. — L'erreur relative sur K, obtenu par ce procédé, est égale à la somme des erreurs relatives possibles sur les deux termes; elle peut, pour chacun d'eux, atteindre $\frac{1}{1000}$; K ne serait connu qu'à $\frac{2}{1000}$ (2) près, ce qui est insuffisant, car les constantes

(1) *Voir* p. 98.

(2) C'est sans doute à une cause de ce genre qu'il faut attribuer le grand écart entre les résultats trouvés par Ayrton et Perry et ceux des autres expérimentateurs qui sont, à très peu près, concordants. Ayrton et Perry mesuraient directement des rapports de capacité alors que, dans les méthodes plus précises, on mesure des variations de capacité.

diélectriques de gaz sont toujours très peu supérieures à l'unité, la virgule étant suivie de trois zéros avant le premier chiffre significatif.

Je vais montrer l'avantage qu'on peut retirer de la manière d'opérer que j'ai indiquée page 30.

En posant

$$K = 1 + \varepsilon = \frac{R'_{gaz}}{R'_{vide}},$$

on tire

$$\varepsilon = \frac{R'_{gaz} - R_{vide}}{R'_{vide}}.$$

J'ai dit que la résistance R avait été choisie de façon que, à quelques ohms près, R'_{vide} soit égal à 100 000 ohms; il suffit donc de diviser par 100 000 la différence $R'_{gaz} - R'_{vide}$ pour avoir ε.

Pour une expérience isolée, la valeur de R′ est déterminée à 0,5 ohm près (1), les pressions, à 1^{mm} de mercure près; j'ai pris comme échelles 1^{cm} pour représenter 10 ohms en abscisses et 1^{cm} pour représenter 10^{cm} de mercure en ordonnées; à part deux ou trois points dans chaque série, tous les points obtenus sont compris dans une bande qui n'a pas plus de $0^{cm},8$ à 1^{cm} de largeur; l'erreur absolue sur la résistance pour une pression déterminée peut atteindre 4 ou 5 ohms; elle est, en général, de 2 ou 3 ohms. L'erreur relative qui en résulte est d'autant plus faible qu'on passe du vide à une pression plus élevée.

Une fois la droite tracée, une différence de résistances à mesurer sur le graphique peut être connue à 0,5 ohm près; à cause de la forme rectiligne de la courbe reliant

(1) Les boîtes employées ne contenant pas de fractions d'ohm, je les appréciais par les déviations que donnait à l'électromètre le fait de boucher ou de déboucher un ohm dans la boîte. Pour des déviations égales, de part et d'autre de la position d'équilibre, j'évaluais à 0,5 ohm la fraction qui aurait été nécessaire pour obtenir le réglage.

la pression aux valeurs de R′, ε est proportionnel à la pression, et l'on peut augmenter la précision en notant la différence des valeurs de R′ pour un écart de pression de 400^{cm} de mercure, par exemple, et ramenant par proportionnalité à une pression de 76^{cm}. Dans ces conditions, l'erreur possible, 0,5 ohm, porte sur 250 ohms environ et l'erreur relative sur la quantité $R'_{gaz} - R'_{vide}$ n'excède pas $\frac{0,5}{250}$, soit 0,2 pour 100. ε le terme important à connaître ne comportera pas, dans le cas le plus défavorable, une erreur supérieure à 0,4 pour 100 : j'ai donné trois chiffres significatifs après les zéros qui suivent la virgule dans la valeur de K — 1.

Les constantes diélectriques pour 76^{cm} de mercure et pour les diverses températures auxquelles j'ai opéré sont rassemblées dans le Tableau II ci-dessous :

TABLEAU II.

Influence de la température sur la constante diélectrique de l'air sous une pression de 76^{cm} de mercure.

Température.	Constante diélectrique.
9°	1,000567 ± 0,000002
13	1,000560
17	1,000548
22	1,000539
29	1,000526
37	1,000516
47	1,000495
58	1,000481
70	1,000463

On peut représenter graphiquement cette variation en portant en abscisses les températures et en ordonnées les valeurs de (K — 1) × 106, on obtient la courbe de la figure 9.

Il n'est pas nécessaire de refaire la même opération pour d'autres pressions ; puisque pour toutes les tempéra-

tures auxquelles j'ai opéré, j'ai obtenu des droites pour représenter la relation entre ε et la pression. Pour des pressions 2×76, 3×76^{cm} de mercure, etc., on aurait la même courbe dont les ordonnées seraient multipliées par 2, 3, etc.

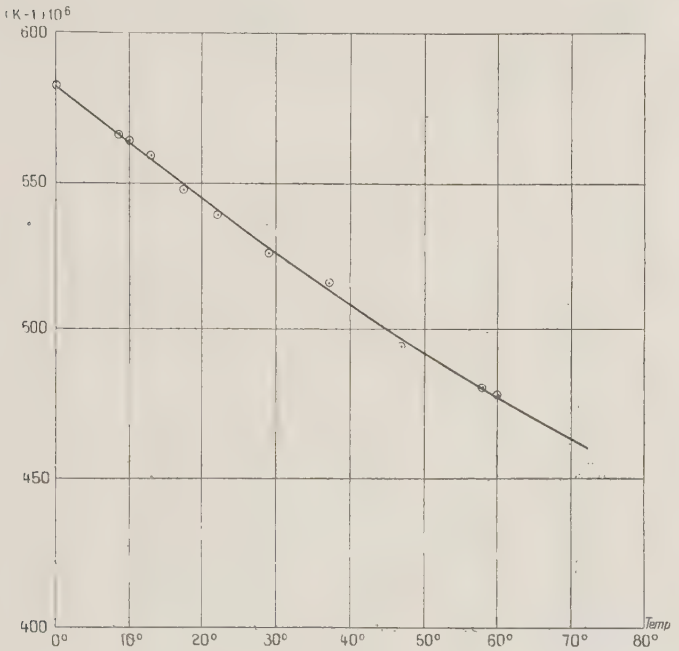

Fig. 9.

Dans le cas de l'anhydride carbonique, le résultat n'est plus tout à fait le même : les courbes obtenues en portant en ordonnées différentes pressions et en abscisses les valeurs de R′ ne sont plus des droites et il y a pour toutes les températures un infléchissement vers l'axe des abscisses à partir de 200^{cm} de mercure. Le Tableau III donne, à titre d'exemple, les nombres relevés à 30°, et le graphique de la page 37 la forme de courbe qu'on obtient. ε n'est plus proportionnel à la pression, et il faut

le déterminer pour chaque valeur de la pression (1). Sur chacune des courbes que j'ai tracées pour diverses températures, j'ai relevé la valeur de ε pour 76, 2×76, 3×76, 4×76 et 5×76^{cm} de mercure; les résultats sont consignés dans le Tableau IV, ci-contre et ils ont servi à tracer le graphique de la page 38, figure 11.

En prolongeant les courbes jusqu'à l'axe des ordonnées, on a les valeurs de 10^{o} (K — 1) à 0^{o} pour chacune des pressions indiquées.

TABLEAU III.

H_1.	$H_0 + H_1$.	H_2.	H.	R'.	R.
			760	100091	97203
2948	3708	3515	192	100038	»
2874	3634	3091	543	100070	»
3860	4620	3452	1168	100140	»
3756	4515	2654	1862	100220	»
3942	4702	2399	2303	100273	»
3654	4414	1733	2681	100320	»
3981	4741	1391	3350	100414	»
3957	4717	1013	3704	100470	»
3843	4603	535	4068	100529	»
3965	4716	423	4293	100580	»
3843	4603	815	3788	100480	»
3895	4655	1294	3361	100410	»
3872	4632	1602	3030	100365	»
3742	4502	1698	2804	100330	»
3759	4519	2218	2301	100270	»
3841	4601	3084	1517	100179	»
3954	4714	3544	1170	100135	»
			760	100089	»
2946	3706	3148	558	100068	»
2970	3730	3411	319	100040	»

avec

$$H = H_0 + H_1 - H_2 \qquad H_0 = 760^{mm}, \qquad t = 30^{o}.$$

(1) Je montrerai, dans la troisième Partie, que ce résultat était à prévoir en raison de la compressibilité du CO^2, qui est plus grande que ne l'indique la loi de Mariotte.

TABLEAU IV.

Influence de la température sur la constante diélectrique de l'anhydride carbonique.

Températures.	Pression en cm de Hg : 76.	152.	228.	304.	380.
o					
9.....	1,00092	1,00186	1,00285	1,00388	1,00507
21.....	1,00091	1,00181	1,00278	1,00377	1,00499
30.....	1,00091	1,00174	1,00267	1,00364	1,00482
42.....	1,00086	1,00169	1,00258	1,00350	1,00462
54.....	1,00080	1,00160	1,00243	1,00329	1,00438
66.....	1,00076	1,00150	1,00231	1,00317	1,00423

Comme dans le cas de l'air, les valeurs de (K — 1) sont connues à 0,4 pour 100 près.

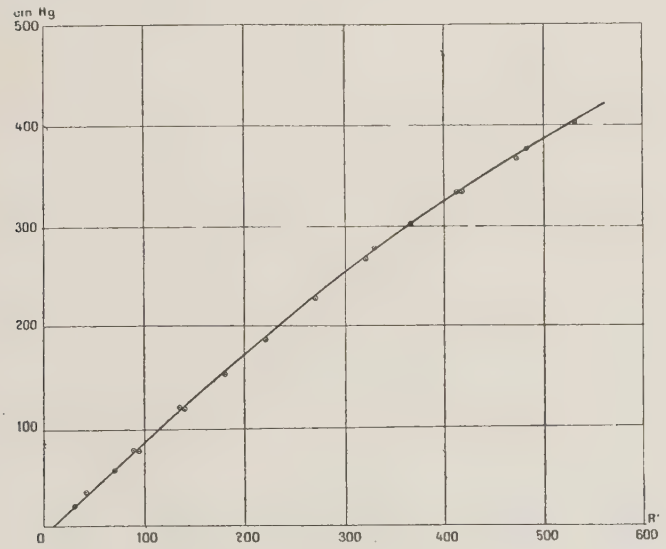

Fig. 10.

Je n'ai pu avec l'anhydride sulfureux pousser les expériences aussi loin qu'avec les deux gaz précédents;

aux températures auxquelles l'appareil me permettait d'opérer, la pression de liquéfaction était relativement

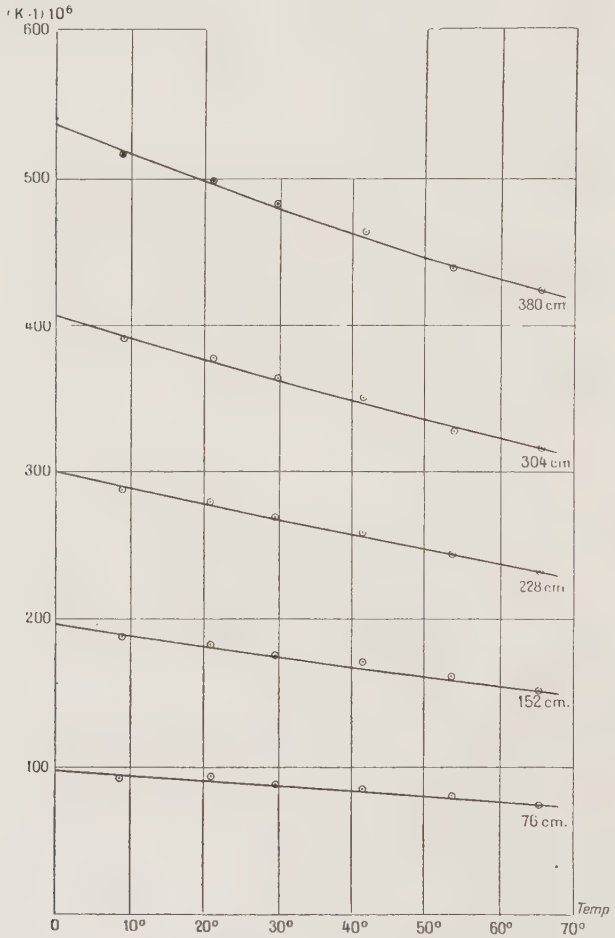

Fig 11.

basse. Il ne m'a même pas été possible d'en approcher bien près parce que l'isolement de l'appareil devenait

rapidement si faible que les mesures étaient impossibles (1). J'ai exécuté onze séries d'expériences à diverses températures, et en poussant jusqu'aux pressions maxima que j'indique ci-dessous; j'ai noté en regard les tensions de liquéfaction pour montrer combien peu j'ai pu en approcher.

TABLEAU V.

Séries.	Températures.	Pression en cm de Hg : Atteinte.	Maxima.
	°		
1.....	9	100	170
2.....	12	115	190
2.....	15	120	215
1.....	19,5	130	250
1.....	26	140	305
1.....	33	145	408
1.....	42	150	500
2.....	58	180	800

Ces mesures ont été faites en faisant varier non pas R′ mais R; il est facile de se rendre compte que, dans ce cas, la constante diélectrique du gaz dans des conditions déterminées est

$$K = \frac{R_{vide}}{R_{gaz}},$$

R_{gaz} et R_{vide} désignant les valeurs qu'il faut donner à R pour avoir l'équilibre de l'électromètre quand T est vide ou bien plein de gaz.

---

(1) Je n'ai pas pu me rendre compte de la cause de cette conductibilité, qui, pour chaque température, se produisait à partir d'une pression bien déterminée et très inférieure à la tension de liquéfaction, cessait dès qu'on détendait, puis reprenait à la compression. L'hypothèse d'un commencement de liquéfaction sur les supports est à rejeter; peut-être y avait-il une ionisation rendant le gaz conducteur avant la liquéfaction?

La courbe de R en fonction de la pression est une droite jusqu'aux pressions de 100^{cm} à 120^{cm} de mercure. A partir de là, il y a une légère incurvation vers le haut comme le montrent le Tableau VI et la courbe ci-dessous,

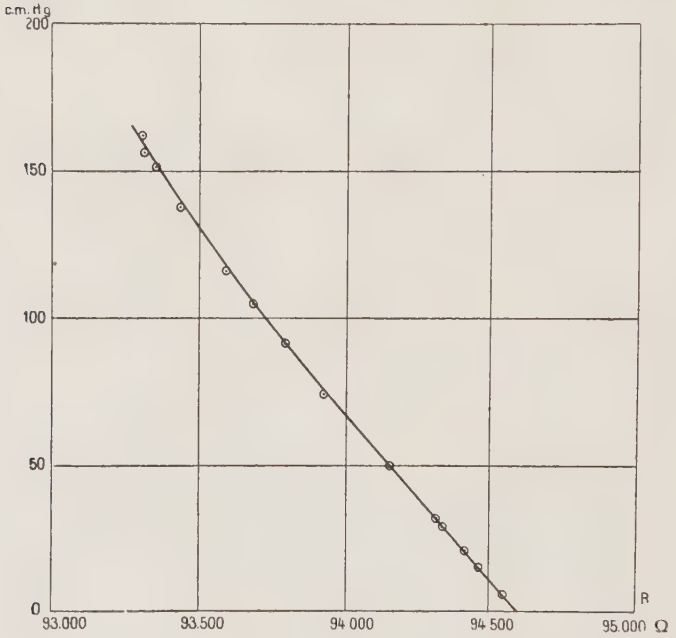

Fig. 12.

(*fig.* 12), de telle sorte qu'il y aurait lieu de déterminer la constante de SO^2 pour chaque pression.

Sur les courbes tracées, j'ai déterminé, pour chaque température, la constante diélectrique correspondant à 76^{cm} de mercure. Les résultats sont consignés dans le Tableau VII ci-contre et reportés sur le graphique de la figure 13. Je n'ai pas pu y ajouter les résultats obtenus à d'autres pressions, 2 $\times$ 76^{cm} de mercure, par exemple, les limites dans lesquelles j'ai dû me tenir étant trop resserrées.

TABLEAU VI.

H_1.	H_0+H_1.	H_2.	H.	R.	R'.
3073	3815	3095	720	93,965	100000
3967	4709	3087	1622	93,305	»
3875	4617	3455	1162	93,600	»
2834	3576	3084	492	94,155	»
3002	3744	3617	127	94,465	»
3178	3920	3638	282	94,335	»
3847	4589	3544	1045	93,695	»
3714	4456	3084	1372	93,440	»
3925	4667	3197	1570	93,310	»
3731	4473	3561	912	93,800	»
3819	4561	3821	740	93,945	»
2971	3713	3411	302	94,325	»
3949	4691	3591	1100	93,615	»
3920	4662	3182	1480	93,355	»
3481	4223	3358	1865	93,795	»
3008	3750	3145	605	94,015	»
3079	3821	3421	400	94,200	»
2465	3207	3152	55	94,520	»

avec

$$H = H_0 + H_1 - H_2, \qquad H = 742^{mm}\,Hg, \qquad t = 58°.$$

TABLEAU VII.

Influence de la température sur la constante diélectrique de l'anhydride sulfureux sous la pression de 76^{cm} Hg :

Températures.	Constantes diélectriques.
9°	1,00861 ± 0,00005
12	1,00850
12	1,00851
15	1,00840
15,5	1,00840
19,5	1,00820
26	1,00784
33	1,00756
42	1,00720
58	1,00670
58,5	1,00665

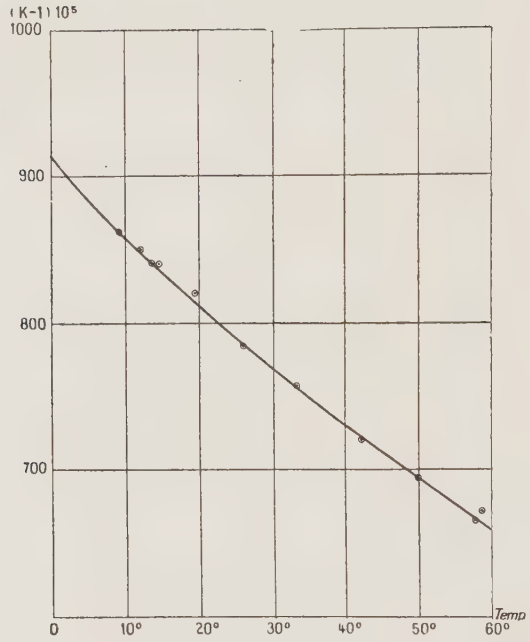

Fig. 13.

DEUXIÈME PARTIE.

Constante diélectrique de l'anhydride carbonique au point critique.

Lorsque le corps dont on veut déterminer la constante diélectrique n'est pas un isolant parfait, les moindres traces de conductibilité entre les armatures du condensateur utilisé dans la méthode précédente suffisent à rendre les résultats extrêmement incertains et obligent à employer d'autres dispositifs.

Pour étudier la constante diélectrique d'un corps au voisinage du point critique, on peut songer à faire décrire des isothermes au corps en question en faisant varier sa pression et son volume. Il faudrait employer un appareil

genre Cailletet dont le tube serait muni d'électrodes spéciales pour les mesures électriques. Mais, comme il y a intérêt à opérer successivement sur la phase liquide et sur la phase gazeuse, et que l'appareil précédent ne permettrait pas d'atteindre facilement ce résultat, j'ai préféré recourir au dispositif de Natterer : le corps en étude, du gaz carbonique, est enfermé dans un tube scellé en quantité convenable pour qu'on ait en présence une phase liquide et une phase vapeur à la température à laquelle on veut opérer.

Dans ce cas, on fait varier la température à volume constant. A l'intérieur du tube cylindrique, à la partie inférieure, sont placés deux petits plateaux de platine, en regard l'un de l'autre; ils peuvent être baignés de toutes parts par le liquide ou par le gaz lorsqu'on place le tube verticalement. Ce sont les deux armatures d'un condensateur dont le diélectrique est le corps sous la phase étudiée. La capacité de ce condensateur dépend de la constante diélectrique du diélectrique étudié, et, comme ses dimensions géométriques restent fixes (1), la comparaison des constantes diélectriques est ramenée à la comparaison des capacités.

Pour la comparaison des capacités, Nernst (39) a indiqué un dispositif analogue au pont de Wheatstone, avec l'emploi de courants variables. Si l'une des capacités à comparer présente une conductibilité notable, il faut adjoindre, en parallèle avec l'autre, une conductance convenable pour avoir de la sensibilité.

Toutefois, j'ai préféré m'adresser à la méthode de Drude (10), qui utilise des oscillations électriques; les temps de charge et de décharge du condensateur, qui sont plus courts, empêchent la conductibilité d'avoir une influence gênante; d'ailleurs, comme je l'indiquerai plus

(1) *Cf* p. 83 la vérification qui en a été faite.

loin, page 87, la conductibilité de l'anhydride carbonique, même liquéfié, est extrêmement faible, et il n'y a pas à craindre de cause d'erreur provenant de ce qu'on étudie un phénomène complexe, où interviennent simultanément la constante diélectrique et la conductibilité.

L'emploi d'oscillations d'une longueur d'onde déterminée peut prêter à une critique : à savoir, que la constante diélectrique peut être différente pour des oscillations de période plus longue ou plus courte, qu'il peut y avoir dispersion normale ou même absorption de certaines radiations et dispersion anomale (*Cf.* p. 93).

Je montrerai qu'il serait difficile d'expérimenter avec des longueurs d'ondes suffisamment différentes de celle que j'ai employée pour qu'on puisse espérer tirer une conclusion concernant l'influence de la longueur d'onde sur la constante diélectrique.

Mais, en employant une longueur d'onde déterminée, on obtient la valeur d'une constante physique dans des conditions expérimentales bien définies : c'est ainsi que souvent on se contente, pour caractériser un corps chimique, de prendre son indice de réfraction pour la seule lumière du sodium.

Dans le Mémoire précité, Drude indique deux méthodes très voisines l'une de l'autre dont voici les principes : dans la première méthode, un oscillateur Blondlot envoie des ondes électriques le long de deux fils de cuivre parallèles. On compare les longueurs d'onde des oscillations lorsque les fils sont plongés dans l'air puis dans la substance à étudier; le rapport de ces deux longueurs est l'indice de réfraction et son carré la constante diélectrique, à condition qu'il n'y ait pas d'absorption. Cette méthode exige des quantités de matière assez considérables et il est impossible de songer à l'employer pour étudier un corps liquéfié au voisinage du point critique.

La seconde méthode n'exige qu'une très petite quan-

tité de substance; ce diélectrique est interposé entre les armatures d'un condensateur minuscule C placé à l'extrémité de la ligne dans laquelle on envoie les ondes; la longueur de cette ligne est variable; on l'ajuste de façon à réaliser la résonance avec le secondaire de l'oscillateur dont la période a été fixée par un pont P réunissant les deux fils. La longueur de ligne nécessaire pour obtenir la résonance dépend de la capacité du condensateur, et c'est par des mesures de longueurs qu'on repère les capacités du condensateur. Comme on le voit, cette méthode se prête fort bien à l'emploi d'un tube de Natterer pour contenir le condensateur et le corps qui lui sert de diélectrique.

Description des appareils. — J'ai adopté le dispositif de Drude auquel j'ai toutefois apporté quelques perfectionnements.

L'appareil 1 comprend (*fig.* 14) :

Un oscillateur avec le dispositif excitateur,

La ligne de longueur variable,

Le condensateur contenant le diélectrique en étude placé dans un bain à température constante,

Un indicateur de la résonance.

L'oscillateur est un oscillateur Blondlot : il est constitué par les deux moitiés C d'un cercle de 5^{cm} de diamètre en fil de laiton de 3^{mm} de diamètre. Ces deux demi-cercles placés en regard l'un de l'autre sont munis à une des coupures de petites boules en laiton poli de 6^{mm} de diamètre, entre lesquelles éclate l'étincelle oscillante. Les deux demi-cercles sont maintenus dans deux supports d'ébonite qui tendent à s'écarter sous l'influence d'un ressort tandis qu'une vis à pas fin les rapproche; on peut ainsi régler la longueur d'étincelle. La longueur la plus convenable est d'environ $0^{mm},5$ à $0^{mm},7$. Des étincelles trop courtes donnent une intensité trop faible.

L'appareil d'alimentation est un petit transformateur Tesla sur lequel je reviendrai plus loin, page 56.

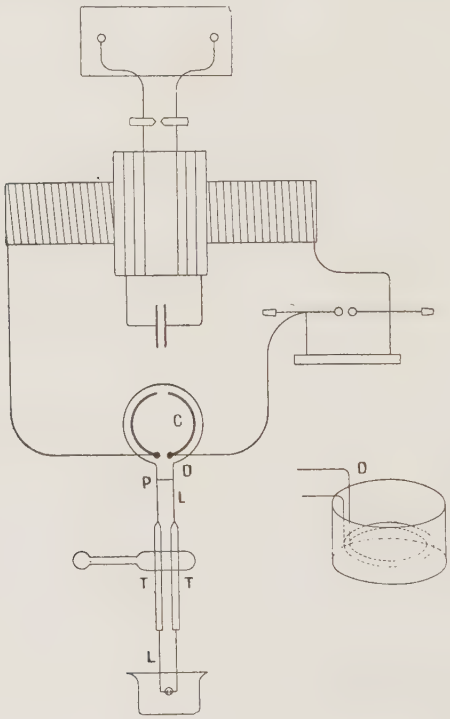

Fig. 14.

Drude conseille de réunir métalliquement à l'excitateur une seulement des deux boules de l'oscillateur et d'amener le fil venant de l'autre à quelque distance, $0^{mm},5$ environ, de la seconde boule; il se produit là une petite étincelle d'accès, dont on peut également faire varier la longueur pour régler l'intensité des ondes [1].

[1] Un dispositif analogue est bien connu des automobilistes qui, souvent, laissent une coupure d'une fraction de millimètre sur le fil de bougie; ils ont reconnu que cette *étincelle d'accès* empêche l'encrassement de la bougie dans le cas où la *magnéto donne trop fort.*

J'ai remplacé ce dispositif par une coupure entre deux boules isolées dans l'air et dont on peut faire varier la distance.

Les deux demi-cercles constituant le primaire de l'oscillateur sont soutenus par un support isolant qui permet de les faire monter ou descendre suivant l'axe du cercle et de les rapprocher plus ou moins du système secondaire. Ce dernier consiste en un fil de cuivre de 1^{mm} de diamètre enroulé suivant un cercle de $5^{cm},5$ de diamètre; on y a laissé une coupure de 2^{cm}; aux extrémités, on a raccordé une ligne de deux fils parallèles distants de 2^{cm}. Cette ligne est recourbée comme l'indique la figure 14 et comporte une partie verticale de 4^{cm} environ de façon que tout l'oscillateur, primaire et secondaire, puisse être plongé dans un petit cristallisoir rempli de pétrole (1).

A une dizaine de centimètres du coude supérieur, les deux fils sont soudés à deux petits tubes de laiton de $1^{mm},5$ de diamètre intérieur, $2^{mm},5$ de diamètre extérieur et 25^{cm} de longueur; ces tubes T sont fixés par une pièce d'ébonite à une plate-forme qui supporte tout l'appareil. A environ 6^{cm} du coude D on a soudé sur les deux fils

---

(1) Avec du pétrole, on obtient plus facilement des étincelles oscillantes; à l'air libre, on serait obligé d'user d'artifices : il faudrait, par exemple, faire un soufflage magnétique ou employer un courant d'air pour arriver au même résultat; de plus, avec un corps d'une assez grande rigidité diélectrique comme le pétrole, il est possible d'établir une différence de potentiel plus grande entre les deux demi-cercles sans qu'il saute des aigrettes ou des étincelles au secondaire qui doit être très rapproché; ceci permet d'augmenter notablement l'intensité des ondes.

Le pétrole que j'ai employé est du pétrole du commerce, raffiné, de la luciline; j'ai constaté qu'au bout d'un certain temps de service dans l'oscillateur, il devient jaune; il s'y forme même un dépôt noirâtre de charbon. Avec ce pétrole ayant servi, filtré, le fonctionnement de l'oscillateur est beaucoup meilleur et les boules s'usent moins qu'avec du pétrole neuf.

un pont de cuivre P réuni au sol, qui fixe la longueur d'onde des oscillations fournies par le système. Je reviendrai plus loin sur le réglage des différentes parties de l'appareil.

Dans les tubes T peuvent coulisser deux fils de cuivre, fixés par leur autre extrémité dans une monture d'ébonite grâce à laquelle on place entre les deux fils un petit condensateur. On peut ainsi modifier la longueur de ligne jusqu'à ce que la partie comprenant le condensateur soit en résonance avec celle qui se trouve derrière le pont. La position de la coulisse dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la capacité du condensateur et par suite, de la constante diélectrique du corps qui le remplit. Elle peut donc servir à la repérer.

Pour déceler le moment où la résonance est atteinte, on utilise la propriété que possèdent les tubes à gaz raréfiés de devenir conducteurs et de s'illuminer lorsqu'ils sont placés dans un champ de force électrique intense. On dispose un de ces tubes à environ 15^{cm} du point B et, au moment où la résonance est réalisée, son éclat passe par un maximum. On peut utiliser pour cette recherche des tubes de Geissler ou bien les tubes servant à l'étude spectrale des raies des gaz; les tubes à acide chlorhydrique sont les plus sensibles; Zehnder (55) a fait établir par la maison Richard Muller-Uri de Braunschweig (1), des tubes remplis de vapeur de sodium électrolytique qui sont extrêmement sensibles; tout récemment, il a indiqué l'emploi de tubes au néon ou au crypton. Tous ces tubes ont la forme indiquée par la figure ci-contre; on utilise leur partie renflée.

Pour obtenir plus de précision, j'ai comparé à l'aide d'un

(1) La description et les usages qu'on peut faire de ces tubes avec les multiples électrodes dont ils sont munis ont été indiqués par Zehnder (*Wied. Ann.*, t. XLVII, 1892, p. 82).

photomètre l'éclat du tube à celui d'une source auxiliaire; une petite lampe électrique de 2 volts, 1 ampère (à filament métallique) alimentée par un élément d'accumulateur donne une bougie, et convient très bien pour cet

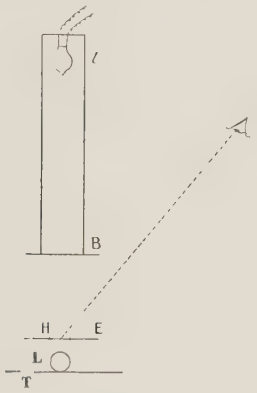

Fig. 15.

usage. L'emploi d'un photomètre perfectionné comme celui de Lummer et Brodhun permet, lorsque le régime des oscillations est bien constant, d'obtenir une grande précision; mais la fatigue causée par la nécessité de laisser l'œil constamment collé à l'appareil vient vite réduire les avantages qu'on en retire, et j'y ai renoncé pour établir un photomètre à tache d'huile dont la figure 15 donne le dispositif. L est le tube luminescent placé sur les fils T, E l'écran en papier filtre blanc portant en H la tache d'huile ou mieux de paraffine; la lampe *l* envoie sa lumière sur E à travers un verre coloré placé en B.

Parmi les tubes dont je disposais, celui qui a donné les meilleurs résultats [1] était un tube privé d'air, contenant

[1] Les résultats sont indépendants du tube employé; leur plus ou moins grande conductibilité apporte une perturbation qui ne peut pas être mise en évidence.

du mercure et destiné à montrer l'illumination par suite d'électrisation des parois lorsqu'on l'agite dans l'obscurité. La luminescence obtenue est violacée et le verre B était de couleur pourpre ; je plaçais l'œil dans la direction O.

Lorsque la distance de la lampe *l* a été choisie de façon à donner un éclairement convenable sur l'écran, il est possible à un œil exercé d'apprécier à 2^{mm} ou 3^{mm} près sur le tirage la position du maximum. Malgré cette indécision, les moyennes prises sur un grand nombre de mesures donnent toujours le même résultat.

Le principal inconvénient de ces procédés de recherche des maxima est la difficulté qui provient du vacillement de la lumière émise par le tube, en raison d'abord du fonctionnement de l'interrupteur de la bobine, puis des irrégularités d'éclatement des étincelles du Tesla et de celles de l'oscillateur.

Pour rendre les mesures plus faciles, j'ai essayé d'utiliser la conductibilité qu'acquiert le gaz raréfié lorsqu'il est rendu lumineux par les oscillations de haute fréquence. La maison Rich. Muller-Uri livre des tubes de Zehnder munis d'électrodes destinées à cet usage (*fig.* 16). Sur un

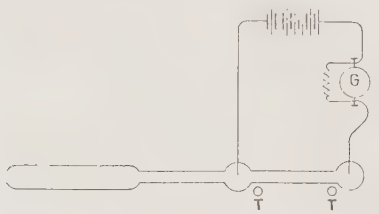

Fig. 16.

circuit comprenant un certain nombre d'éléments et un galvanomètre sensible, on place la portion de tube comprise entre deux électrodes : j'ai utilisé un galvanomètre ayant un moment d'inertie et un amortissement assez élevés, un galvanomètre balistique à cadre mobile, mo-

dèle Carpentier, d'une résistance de 500 ohms; sa résistance critique était d'environ 4000 ohms et je l'avais shunté par 2000 ohms. Cela revenait donc, en quelque sorte, à *donner de l'inertie au phénomène étudié.* En effet le spot avait une position fixe qui rendait les mesures très précises lorsque tout l'appareil était en parfait état : notamment, mercure de l'interrupteur très propre et boules de l'oscillateur toutes neuves et fraîchement polies; mais ces conditions favorables disparaissent très vite et il aurait été trop long de s'imposer de les rétablir constamment; d'autre part, j'ai constaté que les irrégularités de fonctionnement influencent dans le tube, bien plus la conductibilité que l'éclat, si bien qu'au bout de 1 ou 2 minutes de fonctionnement le spot perd de sa stabilité; il en résulte que le procédé le plus rapide de recherche des maxima est celui que j'ai décrit, avec le dispositif photométrique à tache d'huile, et c'est lui que j'ai employé dans presque toutes les expériences.

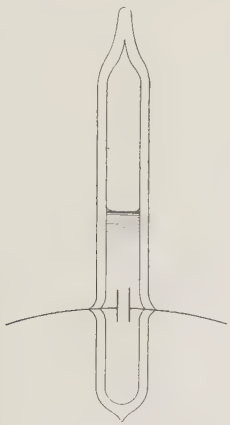

Fig. 17.

Le tube contenant le condensateur est constitué de la façon suivante : un tube de cristal de 9^{mm} de diamètre

intérieur, 3^{mm} d'épaisseur et 150^{mm} de longueur est fermé à ses deux extrémités. Il contient de l'anhydride carbonique liquide et gazeux en quantité suffisante pour que le ménisque disparaisse à la température critique, $31^{o},4$. A 3^{cm} environ d'une des extrémités, la paroi du tube est traversée par deux fils de platine de 1^{mm} de diamètre placés dans le prolongement l'un de l'autre, suivant un diamètre. Extérieurement, on a laissé 2^{cm} de fil de platine destinés à assurer le raccord avec la ligne; à l'intérieur du tube, les deux fils portent normalement à leur extrémité deux petits plateaux qui constituent les armatures du condensateur. J'ai essayé de construire sept de ces tubes avec des dimensions diverses pour faire varier les conditions expérimentales; deux seulement m'ont permis de faire des expériences : les autres ont éclaté.

Le premier était muni de plateaux circulaires de 4^{mm} de diamètre et leur écartement était de 4^{mm} à 5^{mm}; dans le second, qui a d'ailleurs éclaté au cours des mesures, les plateaux étaient carrés, de $5^{mm},5$ de côté, avec coins légèrement arrondis; leur distance de 2^{mm} à 3^{mm}.

Le tube était installé dans une monture en ébonite (*fig.* 18) constituée par deux plateaux pouvant se déplacer parallèlement. A cet effet, l'un de ces plateaux était muni de deux colonnes qui passaient librement à travers deux trous percés dans le second; deux écrous en ébonite permettaient de rapprocher les deux plateaux. Ces plateaux étaient percés chacun d'un trou central destiné à recevoir une des extrémités du tube décrit ci-dessus. Le plateau muni des deux colonnes présentait un trou du diamètre extérieur du tube; les légers renflements produits par les soudures des fils de platine empêchaient le tube de traverser librement. Les deux fils de platine de 2^{cm} sont fixés sur la tranche du plateau sous deux vis de laiton percées suivant leur axe d'un trou

de $1^{mm},5$ de diamètre. Dans ces trous étaient introduites les extrémités des fils de cuivre de la ligne L. Grâce à ce dispositif dont l'ensemble est visible sur la figure 18, il est possible, sans changer la longueur de ligne, de baigner de toutes parts les plateaux du condensateur soit dans

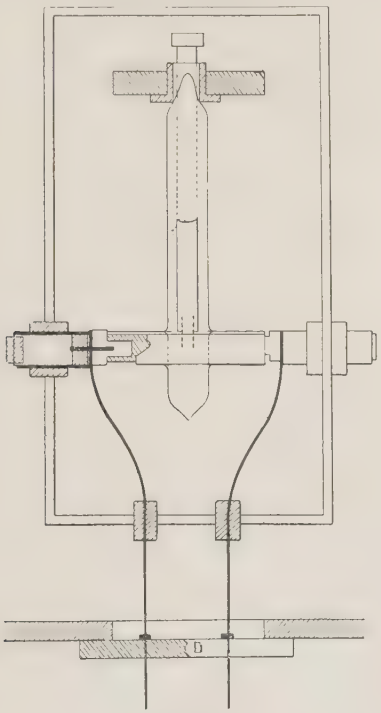

Fig. 18.

le liquide lorsque le tube est dirigé vers le haut (position 1), soit dans le gaz, lorsque le tube est basculé vers le bas (position 2). On substitue ainsi très rapidement le liquide au gaz, et réciproquement, pour faire des séries de mesures croisées. Ces manœuvres répétées assurent, par l'agitation qui en résulte, l'uniformité de température du fluide sur lequel on opère; j'y trouvais un avantage

extrêmement précieux; M. Mathias (35) signale en effet, d'après des expériences de G. Gouy (19) et aussi de B. Galitzine (18), F.-V. Dwelshauvers-Déry (11), la lenteur avec laquelle un tube de Natterer, placé dans une étuve à température constante, prend son état final lorsqu'on le laisse absolument immobile. Pendant un temps plus ou moins long, variable avec les conditions antérieures du tube, ce dernier passe par des états variables; le ménisque se déplace; le rapport des volumes de liquide et de vapeur se modifie : d'après Galitzine, l'influence du temps est telle que la densité du liquide diminue et celle de la vapeur augmente. Mais G. Gouy a montré qu'il est toujours possible de réaliser, à une certaine température, un état capable de persister indéfiniment et qui est l'état final. Pour y arriver, il conseille de retourner le tube bout pour bout un grand nombre de fois, puis de le laisser reposer. Après séparation de l'émulsion en liquide et vapeur on a atteint l'état final. C'est précisément ce que ma méthode m'obligeait à faire pour substituer l'une à l'autre les deux phases sous lesquelles l'anhydride carbonique se trouvait dans le tube.

Cette pratique m'a permis d'opérer par températures tantôt croissantes, tantôt décroissantes, alors que, en général, à cause de la lenteur d'établissement de l'état final, il est recommandé d'opérer par températures décroissantes. J'y ai gagné aussi de pouvoir faire des mesures à températures basses sur un tube qui pouvait ne pas résister à la pression critique (1).

Le tube contenant le corps étudié ainsi que sa monture était disposé dans un bac contenant de l'huile de vaseline dont on pouvait faire varier la température. Ce bac en

(1) C'est précisément ce qui s'est produit avec le tube n° 2 qui a résisté jusqu'à 23° et a éclaté un peu au-dessus de cette température.

verre était percé de quatre trous, deux servant à faire passer les fils de ligne à travers des bouchons de liège, deux autres recevant des pièces destinées à maintenir fixe l'axe autour duquel tournait le tube, comme l'indique la figure 18. Ce bac était protégé contre le refroidissement par une épaisse couche de coton et recouvert d'une caisse en bois pour éviter les accidents en cas de rupture du tube. Le tout était monté sur un chariot pouvant rouler sur deux rails fixés sur la table, parallèlement à la direction des deux fils de ligne. Une paroi verticale fixée à la plate-forme du chariot portait une petite pince en ébonite destinée à serrer les deux fils : sur ces derniers, j'avais soudé deux anneaux de fil de cuivre qui devaient, avant serrage, venir en contact avec l'ébonite. A cette même paroi verticale était collée normalement une règle divisée, se déplaçant devant un index fixé à la table; ce sont les lectures faites sur cette règle qui servent à repérer les positions de la coulisse.

Pour faire varier la température de l'huile, je la retirais et la refroidissais dans un mélange réfrigérant de glace pilée et de sel; puis, je la versais dans le bac; j'ai pu ainsi faire des mesures à $-4°$, température la plus basse que j'aie pu atteindre; puis, je la laissais se réchauffer lentement. Pour monter au-dessus de la température ambiante, l'huile était chauffée par une lampe à incandescence maintenue à la partie inférieure du bain. Le tube condensateur, mobile autour de son axe horizontal, servait d'agitateur.

La température était mesurée par un couple thermoélectrique fer-constantan dont une soudure était placée dans le bain, aussi près que possible du tube, l'autre maintenue dans la glace fondante. Sur le circuit était inséré un galvanomètre Deprez-d'Arsonval, dont le bobinage était en maillechort, de façon à éviter les variations de résistance du circuit provenant des variations de tem-

pératures. La lecture était faite par projection du filament d'une lampe à incandescence sur une règle divisée placée à 3^{m} et la sensibilité était de $3^{mm},4$ par degré d'écart entre les deux soudures.

Dispositif d'excitation de l'oscillateur. — Pour la production d'étincelles entre les boules, il faut une tension assez élevée; une bobine de Ruhmkorff est toute indiquée; mais, ainsi que l'a fait remarquer Drude, toutes les bobines ne conviennent pas également bien; il faut choisir un dispositif qui donne, sous une tension très élevée, un débit aussi faible que possible. Le transformateur de Tesla permet d'atteindre ce résultat.

Le primaire de ce transformateur est constitué par cinq spires de 10^{cm} de diamètre et distantes de 2^{cm} d'un fil de cuivre de $1^{mm},5$ de diamètre. Les deux extrémités de ce bobinage sont réunies aux deux armatures d'une bouteille de Leyde de 7^{cm} de diamètre, $2^{mm},5$ d'épaisseur de verre et 10^{cm} de hauteur. La troisième spire est coupée juste au milieu de la bobine et, dans la coupure, on a placé un éclateur constitué par deux crayons de zinc de 8^{mm} de diamètre dont les extrémités arrondies sont à environ 3^{mm} l'une de l'autre. Cet éclateur est alimenté par une bobine de Ruhmkorff de 10^{cm} de longueur d'étincelle. Le courant du primaire de cette bobine est fourni par une batterie de douze éléments d'accumulateurs. Sur le circuit sont interposés un interrupteur et un rhéostat; l'interrupteur est rotatif, à mercure, avec rupture dans une atmosphère de gaz d'éclairage. Ce système fonctionne parfaitement et le régime de la bobine est tout à fait constant.

Le secondaire du transformateur Tesla est constitué par un bobinage de 150 spires de fil de cuivre de $0^{mm},8$ de diamètre, recouvert d'un guipage de coton et enroulées sur un cylindre de carton durci de 5^{cm} de diamètre,

de façon que les spires se touchent. La bobine ainsi constituée est placée au centre du bobinage primaire et, lorsque la bobine de Ruhmkorff fonctionne, on peut faire éclater entre les extrémités du fil secondaire du transformateur de Tesla des étincelles de 3^{cm} à 4^{cm} de long, extrêmement ténues, qui conviennent fort bien à l'excitation de l'oscillateur.

Réglage des appareils. — Le réglage des appareils qui viennent d'être décrits consiste surtout à réaliser les conditions nécessaires pour opérer d'une façon certaine avec une longueur d'onde connue, d'une part, et avec le maximum de sensibilité pour la détermination de la résonance, d'autre part.

La demi-longueur d'onde de l'oscillation propre du système primaire supposé placé loin de tout conducteur plongé dans le pétrole, est sensiblement égale à sa longueur multipliée par la racine carrée de la constante diélectrique du pétrole qui est 2; on a donc

$$\tfrac{1}{2}\lambda_1 = 5 \times \pi \times \sqrt{2} = 22^{cm} \text{ environ.}$$

Le secondaire placé dans le voisinage sera le siège d'oscillations qui auront leur intensité maxima lorsque sa période d'oscillation propre sera la même que celle du circuit primaire, lorsqu'il y aura résonance. La période d'oscillation du secondaire est fixée par la position du pont P; on peut chercher la position à lui donner pour qu'il y ait résonance en plaçant un tube à vide aussi près que possible de l'endroit où la ligne secondaire quitte le cercle, puis, déplaçant le pont P jusqu'à ce que le tube ait un éclat maximum; si l'on fait cette opération, on constate : 1° que la position du pont P amenant cette résonance n'est définie nettement que lorsque les systèmes primaire et secondaire de l'oscillateur sont relativement éloignés, de 2^{cm} à 3^{cm} environ; pour un écartement de 3^{cm} entre

les deux cercles, on trouve la position de résonance du pont P à 12^{cm} du raccordement de la ligne sur le cercle; 2° la demi-longueur d'onde de l'oscillation ainsi obtenue est d'envron 28^{cm}; pour la mesurer, on cherche la position à donner à un second point P′ pour que le tube à vide placé à égale distance de P et de P′ ait son maximum d'éclat. La longueur PP′ qui représente la distance entre deux nœuds de force électrique, augmentée de la longueur du pont P, représente $\frac{\lambda}{2}$. Le tube a été placé à $\frac{\lambda}{4}$ au milieu de l'intervalle pour être sur un ventre de force électrique.

Malgré la résonance ainsi réalisée, les oscillations secondaires sont relativement faibles, et il est bon, pour la facilité de la mesure, d'augmenter leur intensité. On peut y arriver en rapprochant le primaire et le secondaire qu'il est possible d'amener dans le même plan horizontal.

Mais, même si l'on n'a pas changé la position du pont P, la longueur d'onde ainsi obtenue n'est plus la même et l'on peut, en opérant avec soin, mettre en évidence la présence des deux systèmes d'oscillations de longueurs d'onde λ et λ', qui ont été prévus par Oberbeck (40) et M. Wien (53); c'est ainsi que, par exemple, en rapprochant l'excitateur à 13^{mm} du récepteur, j'ai obtenu des maxima d'éclairement du tube convenablement placé en disposant des ponts à

1° 23^{cm}, 46^{cm}, 69^{cm}, 92^{cm}, 115^{cm}, 138^{cm}

et à

2° 27^{cm}, 57^{cm}, 86^{cm}, 116^{cm}, 146^{cm} du premier,

ce qui correspond à

$$\tfrac{1}{2}\lambda' = 23^{cm} \qquad \text{et} \qquad \tfrac{1}{2}\lambda = 30^{cm}.$$

Après une expérience préliminaire, je plaçais le tube à une distance du pont P égale à $\frac{\lambda}{4}$ du système que je voulais observer.

Pour ne pas être gêné dans les observations faites avec une longueur d'onde déterminée, j'ai cherché à m'affranchir de l'autre, en m'arrangeant de façon qu'elle ne puisse pas agir sur le tube à vide. Une solution consisterait à rendre les deux longueurs d'onde égales; elle est à rejeter, parce qu'en l'appliquant on obtient des intensités trop faibles; j'ai préféré chercher l'accouplement du système tel qu'une des deux longueurs d'onde soit le double de l'autre, et c'est avec la plus longue que j'ai opéré : le tube placé à $\frac{\lambda}{4}$ se trouve à $\frac{\lambda'}{2}$ du pont et seul, le système d'oscillations de longueur d'onde λ l'influencera; on peut opérer comme s'il était seul. En représentant schématiquement les oscillations comme on le fait en acoustique,

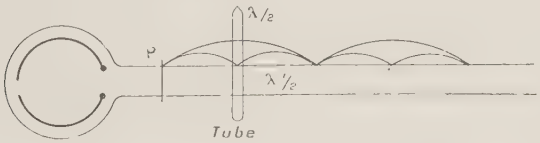

Fig. 19.

on est conduit au graphique de la figure 19. Il est, d'ailleurs, à remarquer qu'il n'est pas nécessaire que le rapport $\frac{\lambda}{\lambda'}$ soit rigoureusement 2; il suffit que le tube luminescent soit suffisamment près du nœud de l'oscillation parasite pour ne pas être influencé par elle.

Pour atteindre ce résultat, on peut rapprocher le primaire du secondaire, ce qui a pour effet d'augmenter la différence entre les deux longueurs d'onde des oscillations qui prennent naissance. Mais la théorie et l'expérience montrent, toutes deux d'accord, que λ, λ', λ_1 et λ_2, longueur d'onde de l'oscillation propre du secondaire supposé écarté du primaire, satisfont à la relation

$$\lambda^2 + \lambda'^2 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 = \text{const.},$$

tant qu'on n'a pas déplacé le pont P. On pourrait ainsi

être conduit pour λ à des valeurs trop grandes pour l'appareil construit, valeurs qu'il est avantageux de réduire.

On peut alors diminuer la somme constante $\lambda^2 + \lambda'^2$ en donnant à λ_2 une valeur plus faible, en rapprochant le pont P de l'origine de la ligne sur le cercle secondaire. On réduit ainsi λ_2 et l'on fait, en même temps, une opération analogue au rapprochement des deux parties de l'oscillateur puisqu'on a supprimé la portion du secondaire la plus éloignée du primaire. D'ailleurs, un déplacement de quelques centimètres du pont P, qui supprime la résonance réalisée ci-dessus, n'a pas grande influence sur l'intensité des ondes au secondaire, lorsque les deux parties de l'oscillateur sont très voisines.

Après de nombreux tâtonnements, j'ai déterminé les positions à donner au pont et aux deux cercles pour être dans les meilleures conditions possibles; ce sont les suivantes : les deux cercles doivent être aussi voisins que possible, dans le même plan, à $1^{mm},5$ ou 2^{mm} d'écart. Quand les deux boules de l'excitateur sont au contact, il y a environ $4^{mm},5$ d'écart entre les extrémités opposées. Le pont P doit être placé à 12^{cm} du raccordement des fils avec le cercle secondaire; il est soudé une fois pour toutes dans cette position. On place le tube à vide à 9^{cm} du pont.

Les deux demi-longueurs d'onde auxquelles ces dimensions donnent naissance sont

$$\frac{\lambda}{2} = 37^{cm} \text{ à } 38^{cm} \qquad \text{et} \qquad \frac{\lambda'}{2} = 18^{cm} \text{ à } 19^{cm},$$

qui sont dans le rapport 2.

C'est donc avec la longueur d'onde de 75^{cm} que les mesures ont été faites.

Étalonnage du tube. — Lorsque l'appareil est bien réglé, comme il vient d'être indiqué, il faut étalonner le tube

condensateur, c'est-à-dire rechercher les positions qu'il faut donner au chariot pour obtenir le maximum d'éclat du tube luminescent, lorsque le tube condensateur contient des corps de constantes diélectriques connues.

D'après les expériences de Linde, je savais que les corps auxquels j'aurais affaire ont des constantes diélectriques comprises entre 1 et 2 ; c'est dans cet intervalle qu'il suffit d'étalonner l'appareil.

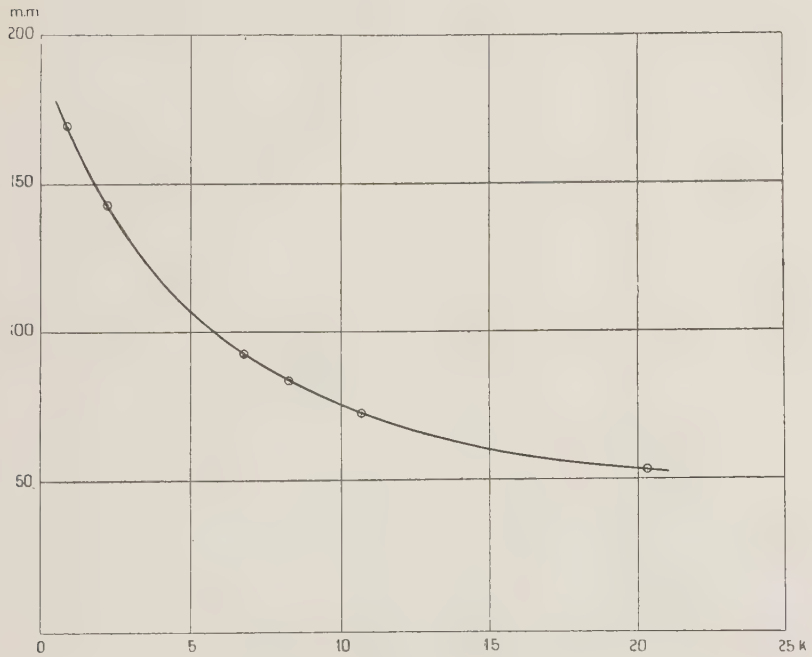

Fig. 20.

Les tubes que j'ai utilisés ont été construits par la maison Berlemont, de Paris. Ils m'étaient livrés, comme l'indique la figure 23, ouverts à un bout, mais avec un étranglement préparé pour faciliter la fermeture au chalumeau après remplissage. Les uns étaient en verre, les autres en cristal; tous avaient été essayés par le

constructeur, après soudure des électrodes, à une pression intérieure de 150^{atm}.

Des expériences préliminaires faites avec des mélanges titrés d'acétone et de benzol m'ont donné la courbe d'étalonnage de la figure 20 pour des constantes comprises entre 1 et 20. Comme on le voit sur cette courbe, il est parfaitement légitime de prendre une droite pour relier les positions du chariot aux constantes diélectriques du corps placé dans le tube tant que celles-ci ne dépassent pas 2,4 ou 2,5. Il suffit donc de deux déterminations.

J'ai choisi comme corps type du benzol préparé par Kahlbaum, de Berlin, suivant un procédé qui assure une grande pureté et, par suite, une grande constance des propriétés physiques. Ce benzol a été étudié par Drude qui a déterminé sa constante diélectrique par la première méthode d'oscillations. Cette constante est de 2,26 à 19°, avec un coefficient de variation de — 0,1 pour 100 par degré centigrade.

Le second corps type que j'ai pris est l'air de constante diélectrique égale à 1 dans les conditions de l'étalonnage.

Les mesures étaient faites avec de l'huile dans le bac, de façon à tenir compte de la capacité provenant des quelques centimètres de fil baignés par l'huile; c'est ici qu'il importe de faire remarquer l'influence de cette huile sur les résultats et les corrections auxquelles sa présence oblige à cause des variations de température.

Nous avons au bout de la ligne une capacité complexe constituée par :

1° Le condensateur d'étude de capacité C lorsqu'il est rempli d'air, et de capacité CK lorsqu'il contient le corps soumis aux expériences;

2° Une petite capacité γ provenant des portions de conducteur en contact avec des diélectriques solides, soit le verre du tube, soit l'ébonite des supports, soit les bouchons de liège;

3° Une capacité provenant, comme je l'ai dit, des portions de fil baignées par l'huile de constante diélectrique k.

Toutes les précautions possibles ont été prises pour que les dimensions géométriques de cette capacité restent invariables, malgré les nombreux démontages de l'appareil. Les fils portent deux bagues de cuivre soudées qui doivent venir en contact avec la pièce d'ébonite fixée à la paroi verticale de la caisse de protection; le bac contenant le bain a, d'autre part, une position bien fixée sur le chariot, et les bouchons de liège à travers lesquels les fils traversent la paroi sont toujours enfoncés de la même quantité; il en résulte que les longueurs de fils baignées, ainsi que leur écartement, sont toujours les mêmes. Pour tenir compte de cette capacité, je la représenterai par une fraction x de C, dans le cas où il n'y a pas d'huile dans le bac. Je suppose que les trois capacités que je viens de décrire sont montées en parallèle entre deux points déterminés : la capacité réellement agissante est [1]

$$\Gamma = CK + \gamma + Cxk.$$

Si Cxk pouvait être regardé comme constant, quelle que soit la température, l'étalonnage serait réduit à la détermination des positions du chariot pour les deux valeurs de K à une température quelconque. Mais k varie avec la température suivant une loi qui a été étudiée par Fuchs (17). La variation est faible : de 2,20 pour 10°, la constante passe à 2,14 pour 60°, suivant une loi sensiblement linéaire; j'ai déterminé la constante diélectrique de l'huile dont je me sers par comparaison avec le benzol, dans un petit ballon; j'ai trouvé 2,15 à 20°, ce qui est un

[1] Cela n'est pas rigoureux puisque les trois capacités en question ne sont pas chargées au même potentiel au même instant; mais il ne s'agit là que d'une correction qui, comme on le verra, n'est pas bien forte et l'approximation de cette hypothèse est suffisante.

nombre un peu supérieur à celui de Fuchs, et 2,165 à 5°; la variation est légèrement plus faible que celle indiquée par Fuchs.

Soit n la lecture sur la règle pour la position du chariot qui donne le maximum d'éclat du tube luminescent lorsque le bac et le tube condensateur ne contiennent que de l'air. La capacité est

$$C + \gamma + Cx;$$

soit n' la lecture lorsqu'on met seulement de l'huile à 19° (constante diélectrique $k = 2{,}15$) dans le bac; la capacité a pour valeur

$$C + \gamma + Cxk;$$

soit n'' la lecture lorsqu'on met du benzol ($K = 2{,}26$) dans le tube, sans huile dans le bac; la capacité est

$$C \times 2{,}26 + \gamma + Cx.$$

D'après ce que nous avons dit page 62, on peut écrire

$$\frac{(C + \gamma + Cxk) - (C + \gamma + Cx)}{(C.2{,}26 + \gamma + Cx) - (C + \gamma + Cx)} = \frac{n - n'}{n - n''},$$

d'où

$$x\,\frac{k - 1}{2{,}26 - 1} = \frac{n - n'}{n - n''} \qquad \text{et} \qquad x = \frac{1{,}26}{1{,}15}\,\frac{n - n'}{n - n''} = 1{,}095\,\frac{n - n'}{n - n''}.$$

On peut comme confirmation utiliser la lecture n''' correspondant à la présence simultanée d'huile dans le bac et de benzol dans le tube, ce qui donne une capacité

$$C \times 2{,}26 + \gamma + Cxk,$$

d'où

$$\frac{(C \times 2{,}26 + \gamma + Cxk) - (C + \gamma + Cxk)}{(C \times 2{,}26 + \gamma + Cxk) - (C \times 2{,}26 + \gamma + Cx)} = \frac{n' - n'''}{n'' - n'''},$$

d'où une nouvelle valeur de x

$$x' = 1{,}095\,\frac{n'' - n'''}{n' - n'''}.$$

Les valeurs que j'ai obtenues pour ces différentes lectures relatives aux tubes 1 et 2 sont contenues dans le Tableau suivant; chacun de ces nombres est la moyenne de 100 déterminations, faites à diverses reprises, par séries de 10.

	n.	n'.	n''.	n'''.
Tube n° 1.....	139,2	131,6	122,0	114,4
Tube n° 2.....	129,9	122,1	97,6	89,9

Les valeurs qui en résultent pour chacun des tubes sont :

Tube n° 1.....	$x = 0,483$	$x' = 0,483$
Tube n° 2.....	$x = 0,264$	$x' = 0,262$

nous pouvons prendre comme moyennes

$$x_1 = 0,483 \qquad \text{et} \qquad x_2 = 0,263.$$

En partant des nombres que j'ai indiqués ci-dessus, pour la constante diélectrique de l'huile de vaseline, je peux connaître pour chaque température la valeur de la capacité des portions de fils baignées dans l'huile : en admettant que la constante diélectrique de l'huile varie linéairement en fonction de la température, on trouve que :

A 0° cette constante est 2,170;

A 31° cette constante est 2,140.

Il en résulte que, dans le cas du tube n° 1, la variation de température de l'huile de 0° à 31° fait passer la capacité dont elle est le diélectrique de

$$0,483.2,17\,C_1 \quad \text{à} \quad 0,483.2,14\,C_1,$$

soit de

$$1,05\,C_1 \quad \text{à} \quad 1,032\,C_1.$$

Si l'on ne tenait pas compte de cette variation en conservant purement et simplement l'étalonnage fait à 19°, on commettrait une erreur qui peut atteindre 1 pour 100. C'est une erreur systématique, petite il est vrai, mais dont il est nécessaire de s'affranchir. Voici comment on peut s'y prendre :

Quand, l'huile étant à 19° et le tube condensateur contenant un liquide de constante K, on fait, pour l'étalonnage, une lecture a sur la règle, cette lecture correspond à une capacité totale

$$C \times K + \gamma + C \times x \times k_{19} = \Gamma.$$

Lorsqu'on fera à $t°$ la même lecture a avec un corps à l'étude dans le tube, cela indiquera que Γ a la même valeur; le corps placé dans le tube aura une constante K_t telle que

$$C \times K_t + \gamma + C \times x \times k_t = C \times K + \gamma + C \times x \times k_{19},$$

soit

$$K_t = K + x(k_{19} - k_t)$$

Les variations de la constante diélectrique de l'huile avec la température étant linéaires, on peut écrire

$$k_{19} - k_t = \alpha(19 - t).$$

or

$$\alpha = \frac{k_0 - k_{40}}{-40} = \frac{2,17 - 2,131}{-40} = -0,001 \text{ pratiquement,}$$

d'où

$$K_t = K - 0,001 \times x \times (19 - t).$$

Pour le tube n° 1

$$K_t = K - 0,001 \times 0,483(19 - t);$$

en commençant les mesures vers — 5°, le terme correctif atteint

$$0,001 \times 0,483 \times 24 = 0,0115;$$

on commettrait en le négligeant une erreur un peu supérieure à 1 pour 100.

Pour le tube n° 2, dont la capacité est notablement plus grande

$$K_t = K - 0,001 \times 0,263(19 - t),$$

l'erreur n'atteint dans les mêmes limites de températures que 0,625 pour 100.

La méthode que j'employais me permettait à peine de compter sur une erreur fortuite aussi faible, et ce n'est qu'en prenant la moyenne d'un très grand nombre de mesures que j'arrivais à une précision de cet ordre [1]; néanmoins, il faut faire la correction due à la variation de température de l'huile, car, en la négligeant, on commettrait une erreur systématique toujours de même sens, qui ne disparaît pas comme l'erreur fortuite, en prenant les moyennes d'un grand nombre d'expériences.

Voici un autre procédé pour faire les corrections dues à la présence de l'huile; ce moyen est plus simple, mais il met moins bien en évidence l'erreur qu'on commettrait en ne les faisant pas :

La capacité des fils $C \times x \times k_{19}$ à la température d'étalonnage prend, pour une température différente t, une valeur

$$C \times x \times k_t > C \times x \times k_{19}$$

si t est plus petit que 19°; il en résulte que la lecture qu'on fait est trop faible d'une certaine quantité; la capacité a augmenté de

$$C \times x \times k_t - C \times x \times k_{19} = C \times x \times \alpha(19 - t);$$

or nous savons qu'une augmentation de capacité de

$$C \times x \times k_{19} - C \times x = C \times x(k_{19} - 1)$$

produit une diminution de lecture de $(n - n')$ millimètres; donc $C \times \alpha (19 - t)$ produit une diminution de

$$\frac{19 - t}{1000} \frac{n - n'}{k_{19} - 1} = L;$$

c'est cette quantité L qu'il faut calculer pour chaque

---

[1] *Cf.* p. 83.

température et ajouter à la lecture pour avoir ce qu'elle aurait été si l'huile avait, malgré le changement de température, conservé la constante diélectrique qu'elle avait à l'étalonnage.

Les deux tubes donnent sensiblement la même valeur de $n - n'$, et l'on peut prendre 7,7 comme moyenne. Pour calculer la valeur de L en millimètres correspondant à chaque température, le plus simple est de tracer un graphique en portant en abscisses les températures et en ordonnées les valeurs de L; c'est le procédé que j'ai employé (*fig.* 21).

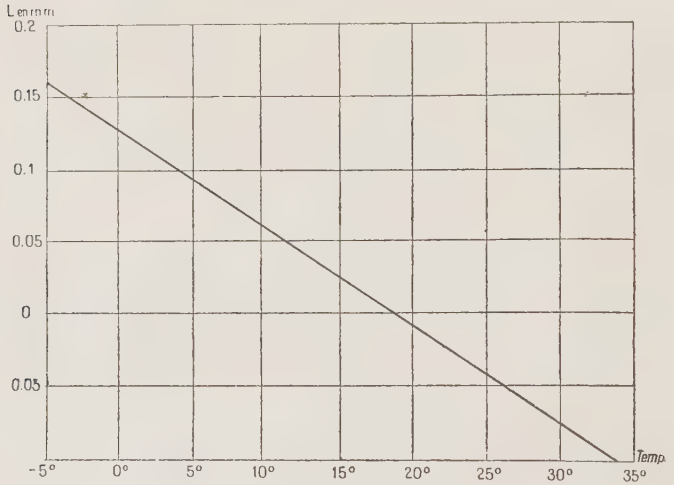

Fig. 21.

Les valeurs de n' et n''' relevées à 19° donnent l'étalonnage du tube; on le traduit graphiquement par une droite relative à chaque tube. J'ai tracé ces deux droites aux échelles de $1^{cm} = 0^{mm},1$ pour K et $1^{cm} = 0^{mm},2$ de tirage. Lorsque, à une température t, on est amené à un tirage déterminé pour obtenir le maximum d'éclat, on ajoute à ce tirage la longueur L pour la température t et

on lit, sur la droite relative au tube qui a servi, la constante correspondant au tirage corrigé (*fig.* 22).

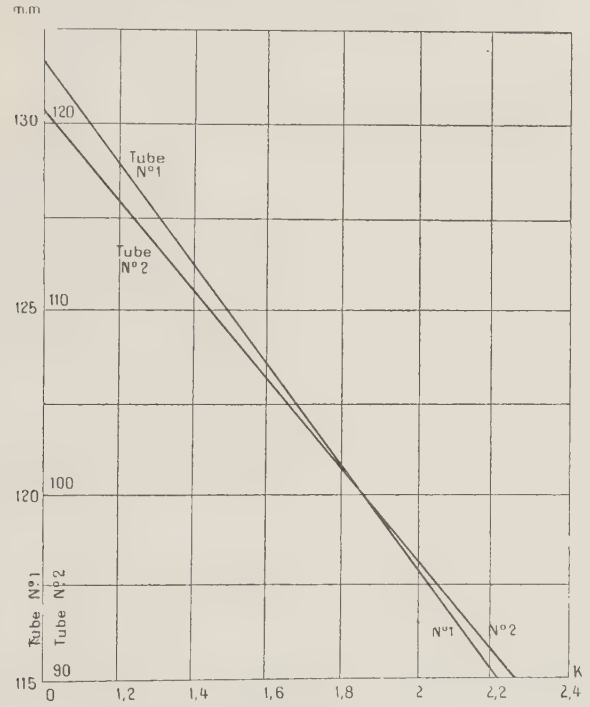

Fig. 22.

Remplissage du tube de Natterer. — Le tube, une fois étalonné, était convenablement séché par un courant d'air sec, puis de CO^2 sec, de façon à faire disparaître les dernières traces du benzol qui avait servi à l'étalonnage.

Enfermé en vase clos, sans corps étranger, l'anhydride carbonique présente, aux températures ci-après, les tensions de vapeur indiquées en regard :

Températures.	Pressions.
o	atm
—79.....	1
—57,6.....	5,1
—25,8.....	17,0
0	35,4
12,4...	49,0
17,1.....	54,88

Au-dessous de 57°,6, sous la tension de vapeur saturante, il est solide; c'est à cette température que s'effectue la fusion. Il en résulte que le remplissage devra avoir lieu en combinant le refroidissement et la pression.

A cet effet, la partie supérieure A du tube T est scellée au mastic de Golaz dans un tube de laiton de diamètre convenable, soudé lui-même à l'extrémité d'un tube de cuivre rouge de 5^{mm} de diamètre t (*fig.* 23).

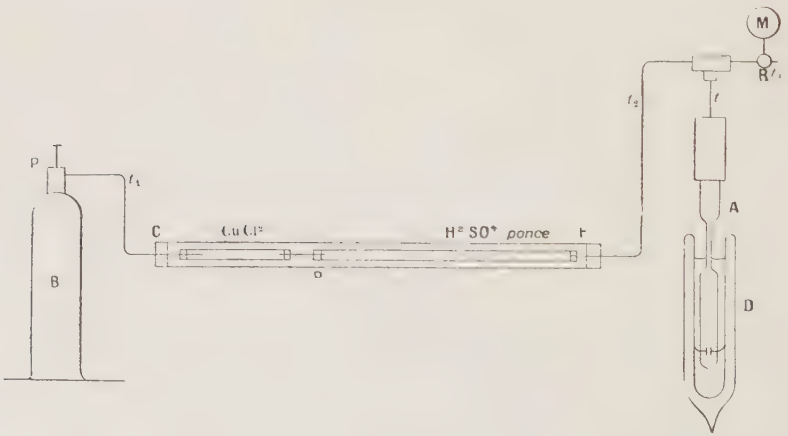

Fig. 23.

L'anhydride carbonique destiné au remplissage du tube était puisé dans la même bombe qui avait servi pour la première série d'expériences (*cf.* p. 21); j'avais renouvelé les produits purificateurs et vérifié à nouveau la pureté du gaz obtenu.

Le tube t_2 aboutissait à un Y en laiton qui le mettait en communication avec t et avec un robinet à trois voies R. Ce dernier permettait d'envoyer le gaz dans l'atmosphère ou bien de fermer le tube en le mettant en relation avec un manomètre métallique M allant jusqu'à 8^{atm}.

L'appareil ajusté, je l'ai purgé de toutes les impuretés gazeuses en comprimant plusieurs fois le gaz à 8^{atm}, puis en le détendant par R t_3. Cette opération m'a permis de constater, en laissant écouler un certain temps entre la compression et la détente, que toutes les parties de l'appareil résistaient à la pression.

Pour procéder à l'opération du remplissage, le tube T était plongé dans un mélange réfrigérant à — 79° obtenu en préparant une pâte d'anhydride carbonique solide mouillé avec de l'acétone. Dans ce but, la neige carbonique obtenue par décompression brusque d'un jet de CO^2 liquide est réduite en petits comprimés de 1^{cm} de diamètre et $0^{cm},5$ d'épaisseur environ dans un petit mortier en bois; le tube T étant plongé jusqu'à l'étranglement dans un vase de Dewar contenant de l'acétone, j'introduisais les petites pastilles de CO^2 dans le liquide jusqu'à ce que le bouillonnement cessât. L'acétone, le vase, et le tube avaient alors pris la température de — 79° pour laquelle la tension de vapeur de l'anhydride carbonique est égale à la pression atmosphérique.

A ce moment on ouvre le robinet p, le robinet R étant disposé de façon à mettre le manomètre en relation avec la conduite; on fait monter la pression jusqu'à 8^{atm}, et l'on ferme p. On constate alors que la pression baisse, d'abord très rapidement, puis de plus en plus lentement jusqu'à 1^{atm}. Si, usant de la flexibilité des divers organes, on retire légèrement le tube T du liquide, on constate que CO^2 se sublime sous forme d'un givre blanc sur les parois du tube. On recommence l'opération jusqu'à ce que le tube semble plein. A ce moment, la masse d'anhydride

carbonique introduite sous forme de neige est très faible; pour se rendre compte de ce qu'il y a dans le tube, on le réchauffe légèrement en remplaçant un peu d'acétone à — 79° par de l'acétone à la température ordinaire; cette précaution est nécessaire pour ne pas exposer le tube à des variations de température trop brusques, ce qui pourrait compromettre sa solidité, surtout aux soudures. La pression augmente et la neige fond, rassemblant tout l'anhydride carbonique introduit au fond du tube sous forme de liquide. On refroidit alors le bain graduellement jusqu'à — 79° en y ajoutant des pastilles; à l'intérieur du tube la pression baisse et le corps redevient solide. On comprime à nouveau et l'on recommence les mêmes opérations jusqu'à ce qu'on ait rempli le tube de liquide à une température de — 55° environ jusqu'à l'étranglement (1).

Lorsque ce résultat est atteint, on laisse évaporer une certaine quantité de liquide jusqu'à ce que le tube ne soit plus qu'aux $\frac{2}{3}$ plein. Les impuretés plus volatiles que CO^2 sont entraînées et le liquide qui reste est purifié. Alors, on refroidit de nouveau le bain pour abaisser la pression de vapeur à la pression atmosphérique; on couvre le vase de Dewar avec une feuille de carton d'amiante percée d'un trou pour le passage du tube rétréci et, en chauffant le tube à l'étranglement avec un petit chalumeau à main, on le laisse se fermer de lui-même en épaississant la paroi.

Cette dernière partie de l'opération est très délicate. Pendant qu'on laisse sortir le CO^2, il faut veiller avec grande attention à ce qu'il n'y ait pas possibilité de

(1) C'est la température du bain; il est fort difficile d'évaluer la température à l'intérieur du tube à cause de l'épaisseur de la paroi de verre; la seule indication qu'on ait est celle du manomètre que je laissais remonter jusqu'à 8^{atm}.

rentrée d'air dans tout l'appareil. A cet effet, le tube t_3 est muni d'un ajutage fin qui souffle sur une petite flamme et permet de surveiller l'opération. Lors du refroidissement final pour la fermeture, le jet de CO^2 par t_3 diminue et, pour éviter tout accident, on ouvre très peu le robinet p. Quand on a atteint la température convenable pour la fermeture, on ferme R et l'on ouvre la conduite en p en dévissant le raccord. On établit ainsi la pression atmosphérique dans tout l'appareil et, dans le cas où il y aurait un appel de gaz en T, il se ferait dans le tube P plein de gaz pur.

Une fois le tube fermé, on recuit très soigneusement la pointe pour éviter des ruptures ultérieures : sur une longueur d'environ 1^{cm}, le verre a en effet été soumis à toutes les températures depuis -79° jusqu'à la température de fusion et il y a là un point très faible du tube.

On laisse alors le tube se réchauffer lentement en l'abandonnant à lui-même dans le bain d'acétone; il lui faut environ 24 heures pour atteindre la température ambiante (au voisinage de 18°). Pendant ce temps, la pression remonte progressivement jusque vers 55^{atm}, et malgré l'essai de résistance à la pression interne qui a été fait par le constructeur, il faut craindre l'éclatement du tube en raison des variations de température qu'on lui a fait subir, et qui ont pu altérer la masse du verre. A partir du moment où le tube est fermé, il est prudent de ne l'approcher qu'après s'être protégé le visage avec un masque d'escrime doublé d'une toile métallique fine, et les mains par d'épais gants de peau. C'est une précaution qu'il faut d'ailleurs prendre pour toutes les mesures et qui les rend extrêmement pénibles. L'expérience m'a montré qu'elle n'était pas inutile : sur cinq tubes qui ont été fermés, un seul m'a permis d'atteindre le point critique; un second a pu être chauffé jusqu'à $23^{\circ},5$ et a éclaté à une

température un peu supérieure ; les trois autres ont éclaté pendant le réchauffement (1).

Il est bien rare que le tube ainsi rempli contienne juste la quantité de substance convenable pour que le ménisque disparaisse au point critique au milieu du tube.

J'ai arrêté l'évaporation du liquide lorsque le tube contenait encore environ les $\frac{2}{3}$ de sa capacité, pour être sûr d'en avoir conservé une quantité plus que suffisante ; il en résulte que le tube se remplit de liquide à une température inférieure à la température critique ; il faut, pendant le réchauffement, surveiller les mouvements du ménisque dans le tube de façon que cette température ne soit pas atteinte avant la température ambiante. Lorsque le tube est plein de liquide, pour une très faible élévation de température, la pression monte énormément et le tube est condamné à éclater. Quand on soupçonne que le tube contient trop de liquide, il faut en retirer ; pour cela, on le refroidit jusqu'à — 79°, et l'on chauffe doucement la pointe de fermeture maintenue hors du bain ; la pression interne étant légèrement supérieure à la pression atmosphérique, par suite du retard de refroidissement dû à l'épaisseur de la paroi, cette pointe s'ouvre d'elle-même et on laisse évaporer une certaine quantité de gaz en maintenant le tube partiellement hors du bain. Quand on juge qu'on en a laissé évaporer suffisamment, en suivant le jet de gaz qui souffle sur une petite flamme, on plonge le tube dans le bain et l'on ferme lorsqu'il ne sort plus que très peu de gaz. Ce moment est difficile à saisir, car, si l'on ferme trop tôt,

(1) L'un de ces tubes, notamment, a éclaté quelques instants après que je l'avais eu en mains pour examiner s'il ne contenait pas trop de CO^2 ; cet accident, dû vraisemblablement aux dilatations de la partie que j'avais réchauffée en la touchant, montre combien le verre du tube était éprouvé, tant par la pression interne que par les tensions qui peuvent se produire dans sa masse.

le verre mou se souffle sous la pression interne et la solidité de la fermeture est compromise; si l'on attend trop, on risque de laisser rentrer de l'air dans le tube.

Avec le premier remplissage, le tube n° 1 se remplissait de liquide vers 25°, mais il ne m'a pas été possible de faire ces mesures au delà de 22°, car à partir de ce moment, pour les deux positions du tube, le liquide touchait les deux plateaux. Après avoir enlevé un peu de CO^2 par le procédé que je viens d'indiquer, j'ai pu opérer jusqu'à 29° sur deux phases distinctes. J'ai encore retiré un peu de CO^2 et il m'a été possible d'atteindre alors 33°; au-dessus de 31°, il n'y avait plus de discontinuité dans le tube et il est vraisemblable que j'étais un peu au-dessous du remplissage critique (quantité de matière trop faible pour le volume).

Le seul tube qui ait résisté au-dessus du point critique est le premier que j'ai réalisé; le second a éclaté vers 25°, mais sans qu'il y ait remplissage de liquide; la pression interne était d'environ 63^{atm}, et malgré la grande habileté avec laquelle les soudures avaient été faites, toutes les précautions prises dans les manipulations pour éviter des variations brusques de température, il est probable que l'abaissement énorme de température à — 79° avait diminué la résistance des soudures, car la fermeture était particulièrement bien réussie et ce n'est vraisemblablement pas elle qui a cédé.

Les résultats obtenus avec les deux premiers tubes m'ont montré qu'il y aurait grand avantage à opérer avec une capacité plus grande de façon à augmenter les écarts entre les lectures et à permettre aussi l'emploi d'une longueur d'onde plus grande. J'ai donc demandé au constructeur de remplacer les deux plateaux par un petit condensateur cylindrique comme l'indique la figure 24. La difficulté de construction était très grande et le résultat beaucoup moins parfait que précédemment; j'ai

rempli trois tubes munis de ce condensateur et il m'a été impossible d'en obtenir un qui tienne au réchauffement malgré toutes les précautions prises. Il est probable que

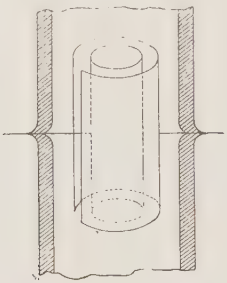

Fig. 24.

la partie inférieure qui avait dû subir un travail au feu assez long était plus facilement altérée par le refroidissement.

Il ne m'était d'autre part pas possible d'employer l'artifice auquel Eversheim avait eu recours pour éviter les éclatements et qui consistait à introduire le tube d'expérience dans une gaine d'acier.

Avec la méthode d'oscillations que j'employais, il fallait éviter la présence de pièces métalliques au voisinage du système d'étude et, particulièrement, une enveloppe métallique entourant le condensateur était à rejeter; les ondes seraient passées par cet écran sans emprunter le chemin du condensateur; dans la méthode de Nernst, au contraire, cela n'a aucune importance.

Devant cet insuccès, après avoir pris conseil de personnes expérimentées et faute de pouvoir obtenir des constructeurs des garanties suffisantes, j'ai dû renoncer au moins momentanément à faire varier les conditions expérimentales, comme il serait si désirable de pouvoir le faire. Peut-être se heurte-t-on là non seulement à une difficulté mais même à une impossibilité matérielle étant

donnés les matériaux dont nous disposons actuellement pour la construction de ces tubes (1).

Il est fort heureux que j'aie pu faire sur le tube n° 1 une série de mesures qui ont été confirmées par les quelques nombres relevés sur le tube n° 2. Il serait intéressant de connaître les raisons qui font que ce tube possède une résistance qui semble exceptionnelle.

Marche d'une expérience. — Les différentes opérations à effectuer au cours d'une expérience sont les suivantes :

Nettoyage du mercure de l'interrupteur et renouvellement de l'atmosphère de gaz d'éclairage dans laquelle doit se faire la rupture du courant.

Polissage sur le tour des boules de l'oscillateur qui ne peuvent pas servir plus de 10 minutes sans s'user et pré-

---

(1) Il est facile de calculer les efforts auxquels est soumis le verre dans les différentes parties de sa masse, uniquement du fait de la pression interne.

Pour une pression intérieure de 75^{atm} (pression critique, 72^{atm},9, d'après M. Amagat), la tension en kilogrammes par millimètre carré suivant l'axe du tube est

$$\frac{\frac{75 \times \pi \times \overline{0,9}^2}{4}}{100 \times \pi \left(\frac{\overline{1,5}^2}{4} - \frac{\overline{0,9}^2}{4} \right)} = 0,42\,\text{kg} : \text{mm}^2.$$

Perpendiculairement à l'axe du tube, dans une section droite, elle a pour valeur

$$\frac{75}{100} \frac{0,9}{0,3.2} = 1,11\,\text{kg} : \text{mm}^2.$$

Ces efforts peuvent être considérablement augmentés par les tensions internes préexistantes provenant du travail au feu, des soudures et du recuit. On ne gagnerait rien, d'ailleurs, à utiliser du verre plus épais, car en diminuant les efforts dus à la pression du gaz, on augmente les chances d'avoir des tensions internes en raison de la mauvaise conductibilité du verre.

senter une face plane ou même une petite cuvette à l'endroit de l'étincelle. Pour le bon fonctionnement de l'appareil il importe que ces boules soient toujours bien polies. Pendant ce temps, si l'on a l'intention d'opérer à une température basse, on a fait refroidir l'huile du bain.

Le tube condensateur étant à sa place, on verse l'huile dans le bac et l'on agite le liquide en basculant le tube condensateur; on constate qu'au début la température s'élève rapidement de quelques degrés, de — 7° à — 4° ou — 3° par exemple, pendant que le bac et toutes les pièces qui y sont contenues se réchauffent; on continue à agiter le liquide et la température remonte de plus en plus lentement; on arrive à n'avoir un réchauffement que de $\frac{1}{10}$ de degré par minute pour les écarts les plus forts avec la température ambiante. On fixe le tube condensateur dans la position 1, par exemple, et l'on met l'interrupteur de la bobine en fonctionnement; pour plus de sécurité, on approche quelques instants le tube à vide du secondaire du transformateur de Tesla de façon à l'amorcer; il devient alors beaucoup plus sensible, puis on le replace à la position qui a été indiquée, page 60. On fait alors l'obscurité et l'on cherche à amener la luminescence au maximum en modifiant le tirage de la coulisse (1), puis on note l'indication sur la règle divisée.

On bascule le tube condensateur vers le bas (position 2), les plateaux sont baignés par le gaz; la capacité est réduite et il faut, pour amener le tube de Zehnder à l'éclat maximum, augmenter le tirage de la coulisse. On lit la nouvelle indication sur la règle, puis on recommence 10 fois de façon à avoir 10 lectures pour la position 1 et 10

(1) Lorsque l'appareil est en bon état, l'intensité des ondes est telle qu'on remarque deux petites taches vertes, produites par des rayons cathodiques, sur le tube luminescent à l'opposé des points où il repose sur les fils.

pour la position 2, ces mesures ayant été faites alternativement et avec agitation du corps étudié entre deux lectures consécutives. Pendant ces opérations la température n'a pas eu le temps de monter de plus de 0°,5, et l'on peut prendre comme température de l'expérience la moyenne entre celle de la fin et celle du début.

Une série d'expériences consiste donc à déterminer pour une certaine température 20 valeurs du tirage alternativement pour le condensateur placé dans le liquide et dans le gaz.

Je donne dans le Tableau VIII ci-dessous les nombres de deux séries d'expériences, l'une à température basse, l'autre au voisinage du point critique :

TABLEAU VIII.

Série n° 1. — Expérience n° 2.

	Température.		Lectures du tirage.	
	Lue.	Vraie.	Vapeur.	Liquide.
	°	°		
	0	0	130	124
	0	0	130	123
	0	0	131	123
	0	0	132	125
	0	0	131	122
	0	0	132	125
	0	0	133	124
	0	0	130	122
	0	0	130	123
	0	0	131	125
Moy.	0	0	131,0	123,6

Série n° 3. — Expérience n° 22.

Températures.		Lectures du tirage.	
Dév. galv.	Vraie.	Vapeur.	Liquide.
	°		
95	29,7	129	127
95	29,7	129	126
95	29,7	128	128
95	29,7	130	129
95	29,7	129	126
96	30	129	127
96	30	130	128
96	30	130	126
96	30	128	127
97	30,2	129	127
Moy...	30	129,1	127,1

Dans le Tableau IX, ci-contre, j'ai rassemblé les moyennes de la valeur du tirage données par les 29 expériences que j'ai faites; elles sont portées dans les colonnes notées *Lu* pour la vapeur et pour le liquide; comme on peut le remarquer, il manque dans ce Tableau les nombres relatifs à la vapeur pour les expériences 14 et 15. Je n'ai pas pu les relever, parce que, comme je l'ai expliqué page 75, avec le remplissage du tube qui a servi pour la série n° 2, à partir de 22°, le liquide touchait les plateaux même lorsque le tube était dans la position 2.

Dans la colonne L, j'ai indiqué pour chaque température de l'huile la valeur de la correction L à ajouter au tirage, comme il a été expliqué page 67. J'obtiens ainsi pour chaque température les valeurs du tirage notées *Corrigé*.

En me reportant alors à la courbe d'étalonnage, je peux trouver les valeurs des constantes diélectriques marquées K_V pour la vapeur, et K_L pour le liquide.

Si l'on construit un graphique en portant en abscisses les températures et en ordonnées les valeurs de la con-

TABLEAU IX.

			Vapeur.			Liquide.		
N°.	Temp.	L.	Lu.	Corr.	K_L.	Lu.	Corr.	k_V.
			Premier tube. — Premier remplissage.					
1....	— 4°	0,15	130,7	130,9	1,05	123,4	123,6	1,585
2....	0	0,12	131,0	131,1	1,04	123,6	123,7	1,580
3....	5	0,08	130,7	130,8	1,055	123,7	123,8	1,575
4....	9	0,06	130,2	130,3	1,09	124,3	124,4	1,525
5....	15	0,02	130,6	130,6	1,075	124,5	124,5	1,520
6	22	—0,01	129,5	129,5	1,15	125,5	125,5	1,445
			Premier tube. — Deuxième remplissage.					
7....	—2	0,14	131,2	131,3	1,02	123,2	123,4	1,600
8....	2	0,11	131,1	131,2	1,03	123,3	123,4	1,600
9....	9	0,06	130,8	130,9	1,05	123,8	123,9	1,560
10....	12	0,04	130,6	130,6	1,07	124,5	124,5	1,520
11....	16	0,02	130,4	130,4	1,085	124,6	124,6	1,515
12....	20,4	—0,01	130,1	130,1	1,105	124,9	124,9	1,490
13....	25	—0,04	129,9	129,9	1,125	125,5	125,5	1,445
14....	28	—0,06				126,5	126,4	1,385
15....	29	—0,07				127,3	127,2	1,325
			Premier tube. — Troisième remplissage.					
16....	—4	0,15	129,9	131,1	1,04	123,2	123,4	1,595
17....	2	0,11	130,7	130,8	1,06	123,8	123,9	1,560
18....	6	0,085	130,5	130,6	1,075	124,1	124,2	1,540
19....	17	0,01	129,9	129,9	1,125	125,1	125,1	1,475
20....	25	—0,04	129,3	129,3	1,165	126,1	126,1	1,400
21....	28	—0,06	129,2	129,1	1,185	126,9	126,8	1,350
22....	30	—0,075	129,1	129,0	1,19	127,1	127,0	1,335
23....	31	—0,08	127,8	127,7	1,285	127,6	127,5	1,300
24....	33	—0,1	127,8	127,7	1,285	128,0	127,9	1,270
25....	30	—0,075	128,4	128,3	1,255	128,3	128,2	1,250
			Deuxième tube.					
26....	—2	0,14	119,1	119,3	1,05	106,3	106,5	1,575
27....	7,5	0,075	118,6	118,7	1,075	107,1	107,2	1,545
28....	19	0	118,2	118,2	1,095	108,4	108,4	1,495
29....	23,5	—0,03	117,5	117,5	1,125	109,5	109,5	1,450

stante diélectrique, les points obtenus se rangent très nettement suivant deux branches de courbe qui vont en se rapprochant au fur et à mesure que la température s'élève; la variation est plus grande pour le liquide que pour la vapeur; d'autre part, les deux courbes tendent à se raccorder par une tangente verticale à la température

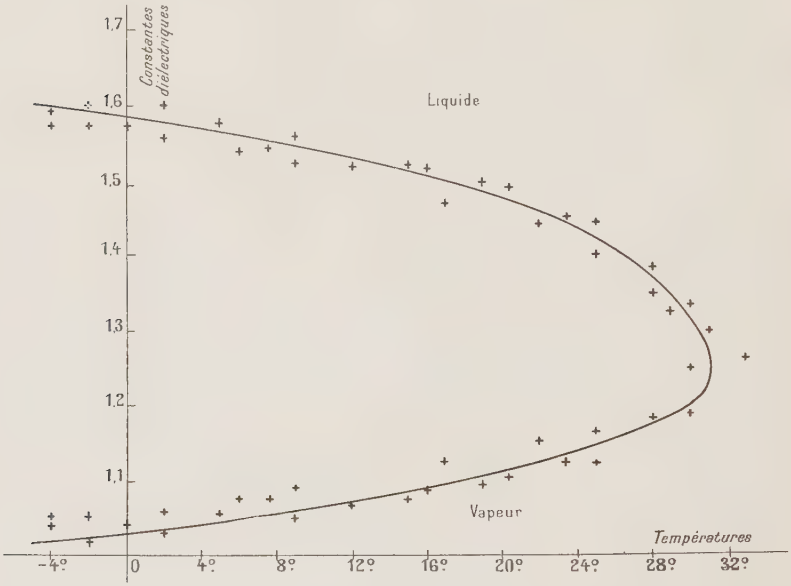

Fig. 25.

de 31°,4. Les valeurs de la constante diélectrique lues sur la courbe sont données par le Tableau X.

TABLEAU X.

	Températures.	Liquide.	Vapeur.
Pour $\lambda = 75^{cm}$	0	1,58	1,04
	10	1,54	1,07
	20	1,48	1,11
	30	1,32	1,20

Précision, causes d'erreurs. — Les résultats relatés ci-dessus sont ceux qui ont été donnés par l'expérience. Je vais examiner la précision sur laquelle il est permis de compter.

Dans ces mesures, différentes causes peuvent affecter les résultats d'erreurs soit systématiques, soit fortuites.

Les précautions que j'ai décrites pour la construction et le réglage des appareils me permettent d'espérer que l'erreur systématique provenant des démontages de l'appareil, qui auraient pu changer les dimensions de quelqu'une des parties, est très faible.

La dilatation du verre du tube sous l'influence de la pression interne doit changer légèrement l'écartement des plateaux du condensateur; il en est de même de l'élévation de température; ce changement est assez faible pour pouvoir être négligé. Des visées au microscope à oculaire micrométrique ne m'ont pas permis de mettre en évidence la plus petite variation de distance des plateaux dans l'air, le tube étant ouvert, et dans le gaz carbonique, le tube étant rempli et scellé à la température de 19°, par conséquent sous une pression de 55^{atm}.

J'ai adopté, pour l'étalonnage des appareils, la valeur de la constante diélectrique indiquée par Drude pour le benzol pur. Le corps sur lequel avaient porté ses expériences venait de la maison Kahlbaum, de Berlin; je me suis procuré du benzol provenant de la même maison; par mesure de précaution, j'ai mesuré, dans mon appareil étalonné avec le benzol Kahlbaum, la constante diélectrique du benzol pur cristallisable fourni par la maison Merk, de Darmstadt, et j'ai trouvé, à moins de 1 pour 100 près, le même nombre, ce qui indique que j'avais bien affaire à un corps chimique de constitution nettement définie; c'est à sa constante diélectrique que sont rapportées celles que j'ai indiquées ci-dessus.

Les erreurs accidentelles peuvent affecter la valeur de

la température en raison de la mauvaise conductibilité des milieux interposés entre la pince thermo-électrique et le corps étudié; mais les renversements du tube-condensateur assuraient une uniformité qui s'est montrée suffisante.

Les nombres trouvés dans chaque série d'expériences, soit pour le liquide, soit pour la vapeur, peuvent différer entre eux de 3^{mm}; dans beaucoup de séries, ils ne diffèrent que de 2^{mm} au maximum; dans les cas où l'écart dépassait 3^{mm}, la série était annulée; les différences provenaient, en général, d'un fonctionnement défectueux des boules de l'oscillateur, et la série, recommencée après remise en état de cette partie de l'appareil, donnait de bien meilleurs résultats; il reste toujours, néanmoins, une erreur personnelle assez forte dans la recherche du maximum; il faut opérer dans l'obscurité, redonner de la lumière après chaque réglage pour faire la lecture et l'on se fatigue très vite, surtout avec le masque sur la figure. D'autre part, il y a une assez grande variation possible sur le tirage sans que l'éclat du tube semble faiblir.

Les maxima étaient déterminés en réduisant de plus en plus les oscillations du chariot portant le condensateur. On conçoit facilement qu'on puisse trouver des résultats différents pour le tirage correspondant à la résonance, si l'on s'en approche par des valeurs croissantes ou par des valeurs décroissantes.

La pesanteur peut faire intervenir une cause d'erreur appréciable, ainsi que l'a montré M. Gouy (19). Le liquide qui se trouve dans les parties inférieures du tube est comprimé par les couches supérieures. Dans le fluide, à la partie supérieure, la pression est un peu moindre qu'au voisinage du liquide : c'est seulement dans une très mince couche de part et d'autre de la surface de séparation que le liquide et la vapeur sont dans leur état normal à la température de l'expérience. Loin du point critique,

l'erreur qui peut provenir de ce fait est faible; mais il n'en est plus de même au voisinage immédiat du point critique, où la compressibilité des fluides est infiniment grande, puisque

$$\frac{dp}{dv} = 0, \qquad \frac{dv}{dp} = \infty.$$

Au moyen des éléments critiques de CO^2 donnés par M. Amagat (1), M. Gouy a pu calculer que, dans un tube vertical de 10^{cm} de haut, porté uniformément à la température critique, il peut y avoir une différence de 6 pour 100 entre les densités du liquide en haut et en bas; il conseille, pour s'affranchir de cette cause d'erreur, de faire les mesures sur le tube placé horizontalement. Cela m'était impossible; mais je me suis arrangé de façon à avoir une hauteur de liquide aussi faible que possible, ne dépassant pas 1^{cm} au-dessus du condensateur. Dans le cas de la vapeur, je n'ai pris aucune précaution spéciale. Comme on le verra plus loin, la précision avec laquelle les mesures étaient faites, ne légitimerait pas une correction à ce point de vue.

L'écart maximum de 3^{mm} entre les valeurs extrêmes trouvées pour le tirage dans une série d'expériences conduirait à une différence sur les constantes diélectriques de 0,20 en la calculant pour chaque point. En admettant, ce qui est toujours à peu près vérifié, que la valeur moyenne des dix mesures coïncide sensiblement avec la moyenne des deux valeurs extrêmes, on voit qu'il y a une erreur possible, en plus ou en moins, de 10 pour 100 sur la constante diélectrique dans le cas le plus défavorable où elle est voisine de 1.

Dans les séries où l'écart n'est que de 2^{mm}, la différence des constantes correspondant aux valeurs extrêmes n'est que de 0,14 et, si on la rapporte à la valeur moyenne de K (1,30), cela donne une erreur possible, en plus ou en

moins, de

$$100\,\frac{0,14}{2.1,30} = 5 \text{ à } 6 \text{ pour } 100.$$

Si, maintenant, nous envisageons la courbe décrite plus haut, page 82, aux échelles de 1^{cm} représentant 0,05 pour les constantes diélectriques et 1^{cm} représentant 1^{o}, nous constatons que tous les points obtenus, à part quelques isolés, se trouvent dans une bande de 1^{cm} de large, comprenant au milieu d'elle la ligne tracée comme satisfaisant au plus grand nombre de points. Nous pouvons donc compter sur une précision finale de 2,5 pour 100 pour un point lu sur la courbe.

C'est pour accroître cette précision qu'il aurait été désirable, comme je l'ai déjà mentionné, de pouvoir faire varier les conditions expérimentales.

Avec les capacités plus grandes que je me proposais de réaliser en donnant au condensateur la forme cylindrique, les déplacements auraient été augmentés, pour les mêmes variations de la constante diélectrique, et ceci sans que la longueur d'onde fût changée. Je l'ai vérifié lors de l'étalonnage préalable des tubes qui ont éclaté pendant le réchauffement.

D'autre part, ces capacités plus fortes auraient permis d'entreprendre des mesures avec une longueur d'onde environ triple en conservant la même précision relative que dans mes mesures; j'avais monté l'appareil et également vérifié ce point.

Avec l'appareil à longueur d'onde triple, j'ai essayé de faire des mesures sur le tube n° 1 qui me reste intact; mais elles ne m'ont conduit à aucun résultat intéressant. La capacité, déjà un peu faible pour les mesures avec la longueur d'onde de 75^{cm}, était absolument insuffisante pour une longueur d'onde plus grande.

Les déterminations de la constante diélectrique avec des ondes de longueur différente auraient permis de voir

si le CO^2 possède une dispersion normale; il faudrait, pour cela, s'adresser principalement à des ondes plus longues que celles que j'ai utilisées; en réduisant la longueur d'onde, j'ai constaté qu'on arrive difficilement à avoir assez d'énergie pour faire briller le tube à vide.

Conductibilité du gaz carbonique liquéfié. — En même temps que la constante diélectrique, j'avais eu l'intention de suivre la conductibilité de CO^2 liquide lorsqu'on fait varier sa température, les renseignements faisant complètement défaut sur ce point.

La méthode de Kohlrausch ne m'a donné aucun résultat, la résistance étant trop grande. J'ai eu recours à la méthode de la déviation employée avec un galvanomètre sensible et une source de force électromotrice élevée (*fig.* 26).

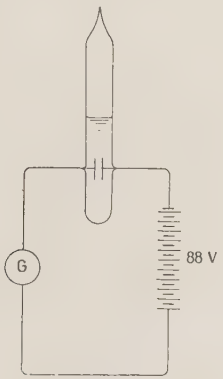

Fig. 26.

J'ai utilisé un galvanomètre Thomson réglé de façon à avoir une constante de 3000 mégohms environ. Comme source, j'ai employé une batterie d'accumulateurs de 88 volts. La déviation obtenue en mettant le tout en série, était de 1,5 division, ce qui correspond à une résistance de 4500 mégohms. Il faut remarquer que la conductibilité

du verre du tube par la masse et par la surface, même bien nettoyée à l'alcool et à l'éther, serait seule de nature à donner une déviation de l'ordre de celle qui a été relevée. Si l'on n'en tient pas compte, on peut conclure que la résistivité de l'anhydride carbonique sur lequel j'ai opéré est énorme; il y a donc tout lieu de penser que j'avais affaire à un corps bien pur.

Les plateaux ayant une section de $\frac{\pi}{4}\cdot \overline{0,45}^{2\,cm^2}$ et un écartement de $0^{cm},5$, la résistivité du CO^2 peut être évaluée à

$$45000\,\frac{\pi.\overline{0,45}^{2}}{4.0,5} = 14100 \text{ mégohms-cm}^{-1}.$$

APPENDICE A LA TROISIÈME PARTIE.

EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES SUR SO^2.

Avant de m'engager dans la réalisation du tube de Natterer à anhydride carbonique qui promettait de sérieuses difficultés, je m'étais assuré, par des expériences préliminaires, qu'on pouvait, par la méthode de Drude, mettre en évidence des variations de la constante diélectrique d'un gaz liquéfié lorsqu'on fait varier sa température.

Je me suis adressé pour cela à l'anhydride sulfureux liquide dont la pression aux températures ordinaires n'est que de quelques atmosphères. J'ai distillé ce corps pris dans un siphon du commerce, en le faisant passer à travers un long tube rempli de ponce sulfurique. Il arrivait dans un petit tube à électrodes refroidi par un mélange de glace pilée et de sel (*fig.* 27); pour faciliter la liquéfaction, il était pratique de réaliser une très légère pression dans le tube de la façon suivante : le gaz à condenser arrivait par un tube capillaire, qui traversait un bouchon B et pénétrait dans la partie inférieure du tube T.

Le bouchon était muni d'un autre tube capillaire *c* qui permettait aux gaz non liquéfiés de s'échapper; de cette façon, la pression dans T était un peu supérieure à la

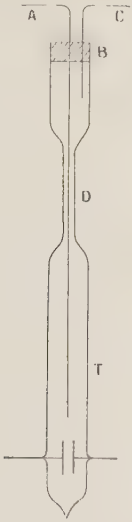

Fig. 27.

pression atmosphérique et la liquéfaction se produisait très aisément. Le tube T étant rempli, je le réchauffais un peu pour faire partir les corps plus volatils que SO^2 et quand il était à demi-vide, je le replongeais dans le mélange réfrigérant pour le fermer à la lampe en D lorsque la pression intérieure était égale à la pression atmosphérique. Ce tube T était disposé dans un thermostat très rudimentaire contenu dans une petite caisse de bois et protégé contre le refroidissement par du coton; la caisse était mobile sur une glissière fixée à la table, parallèlement aux fils de l'appareil de Drude. Le thermostat consistait en deux tubes concentriques laissant entre eux un espace annulaire dans lequel je pouvais faire circuler de l'eau à température constante. Cette eau était

amenée et emmenée par deux tubes de caoutchouc, qui n'empêchaient pas les déplacements du système. Le tube contenant le SO^2 était disposé au fond du tube central dont l'ouverture était bouchée par un tampon de coton; un thermomètre mesurait la température de l'enceinte (*fig.* 28).

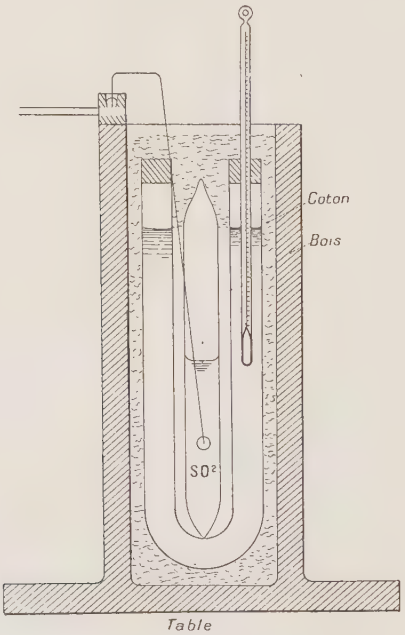

Fig. 28.

Les électrodes du tube T étaient deux disques de platine de $0^{cm^2},25$ de surface distants de $0^{cm},5$. Les deux fils de platine, soudés dans la paroi qui les supportaient, étaient prolongés par deux fils de cuivre qui sortaient du thermostat en longeant le tube T. Ces fils de cuivre étaient recourbés pour plonger dans deux petits godets de mercure de 2^{mm} de diamètre, auxquels aboutissaient également les deux fils qui coulissaient dans l'appareil

de Drude. Ces deux derniers étaient vissés dans une pièce d'ébonite fixée sur le bord de la petite caisse contenant le thermostat.

Les tirages de la coulisse étaient mesurés avec un double décimètre par l'écart qui se trouvait entre cette pièce d'ébonite et l'extrémité des tubes servant de coulisses.

Avant le remplissage, j'avais étalonné le tube en y mettant du benzol, de l'acétone et des mélanges titrés de ces deux corps dont les constantes diélectriques sont indiquées par Drude. J'ai fait sur le SO^2 trois séries de mesures, qui m'ont donné les moyennes suivantes pour 20 expériences :

TABLEAU XI.

Températures.	Tirages.	Constantes.
4°	13,35	9,3
16	13,83	8,25
41	14,80	6,7

En représentant ces résultats par une courbe, on obtient le graphique de la figure 29.

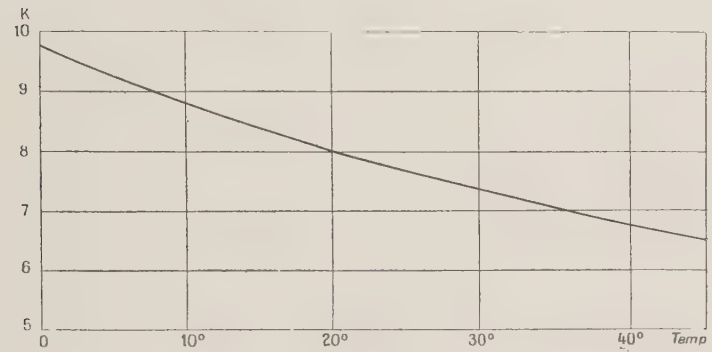

Fig. 29.

Ce sont ces résultats intéressants qui m'ont décidé à entreprendre les recherches sur CO^2 que j'ai décrites.

TROISIÈME PARTIE.

Examen des résultats.

Après m'être borné, dans les Chapitres précédents, à donner les résultats tels qu'ils ont été fournis par les expériences, tout en y apportant toutefois les corrections nécessitées par les méthodes employées, je vais examiner maintenant les conclusions qu'on peut en tirer.

Les résultats peuvent être utilisés de deux manières. Il est d'abord intéressant de les comparer aux résultats antérieurement acquis, auxquels ils sont susceptibles d'apporter une confirmation pure et simple ou une extension. J'aurai l'occasion de les rapprocher à un autre point de vue des nombres trouvés par mes prédécesseurs : les théories faites sur la matière, les formules qui en découlent, les relations entre les diverses propriétés des corps doivent permettre de prévoir ces résultats nouveaux; la relation de Maxwell et celle de Mossotti-Clausius sont celles qui nous intéressent plus particulièrement ici où nous envisageons les constantes diélectriques; je me propose de montrer jusqu'à quel point elles se trouvent confirmées par les résultats que j'ai acquis.

1. *La relation de Maxwell.* — Dans la théorie des diélectriques qu'il a publiée en 1865, Maxwell (36) établit qu'il doit exister entre la constante diélectrique K d'une substance et son indice de réfraction n la relation

$$K = n^2.$$

Mais cette relation, établie par l'étude de la propagation d'une oscillation de fréquence déterminée, n'est valable qu'autant que les deux constantes sont relatives à la même fréquence.

On sait que le phénomène de dispersion connu en

Optique pour les radiations visibles et certaines radiations invisibles, comme les radiations calorifiques ou chimiques, existe aussi pour les ondes électriques (20). On connaît même des corps présentant pour les ondes électriques le phénomène de la dispersion anormale (10).

Dans de telles conditions, il semble bien téméraire de chercher à vérifier la loi de Maxwell en comparant les indices de réfraction mesurés pour des radiations lumineuses aux constantes diélectriques déterminées par des méthodes statiques (ce qui correspond à une longueur d'onde infinie) ou par des oscillations de quelques décimètres de longueur d'onde dans l'air; mais il y a, dans le cas des gaz, deux circonstances avantageuses qui légitiment cet essai :

1° Les études de la dispersion des gaz ont montré qu'en général elle est extrêmement faible; il est donc permis de penser que l'indice de réfraction pour les grandes longueurs d'onde ne différera pas beaucoup de celui qui correspond aux très faibles longueurs d'onde;

2° En second lieu, la dispersion anomale optique se produit pour les radiations qui sont absorbées par le corps qui présente ce phénomène [1].

---

[1] Dans le cas de dispersion normale, la courbe qui relie l'indice

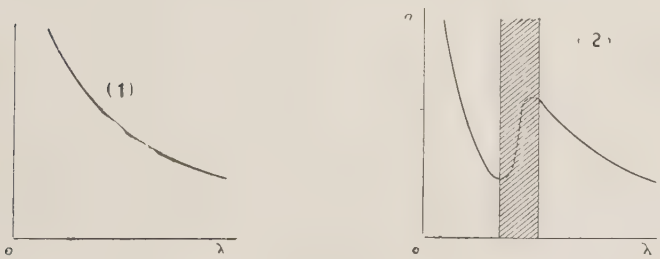

Fig. 30.

de réfraction à la longueur d'onde a la forme (1) (*fig.* 30); s'il y a absorption des radiations dont la longueur est comprise dans la

En électricité, l'absorption se traduit par une conductibilité plus ou moins grande de la substance; or, les mesures statiques ne sont possibles que sur des corps parfaitement isolants; d'autre part, l'anhydride carbonique liquide que j'ai soumis aux expériences possédait une résistance énorme; il est donc vraisemblable que, dans les mesures statiques, et dans le cas de CO^2, je n'aie pas eu affaire à des corps présentant le phénomène de la dispersion anormale; l'anhydride sulfureux, qui m'a servi dans les expériences préliminaires de la seconde méthode, en raison de sa résistance plus faible, a pu le présenter.

Nous ne connaissons actuellement les indices de réfraction des gaz que j'ai étudiés que pour les radiations lumineuses. Dans le Tableau XII ci-dessous, j'ai rassemblé les constantes diélectriques que j'ai trouvées pour les trois gaz étudiés dans la première Partie de ce travail, celles qui avaient été trouvées précédemment, et les valeurs de l'indice de réfraction et de son carré; ces nombres sont rapportés à une pression de 760^{mm} de mercure et à la température de 0^o.

TABLEAU XII.

	K.						
Gaz.	Boltzmann.	Ayrton et Perry.	Klemenčič.	Bädeker.	Verain.	n pour le jaune (41).	n^2.
Air..	1,000590	1,001500	1,000586		1,000585	1,0002926	1,0005852
CO^2.	1,000946	1,002300	1,000984		1,000975	1,0004498	1,0008996
SO^2.		1,005200	1,00954	1,00993	1,00906	1,0007026	1,0014052

La loi de Maxwell $K = n^2$ est donc aussi parfaitement vérifiée qu'on peut le désirer dans le cas de l'air; on peut

---

zone hachurée (2), l'indice de réfraction suit une courbe analogue à celle qui est indiquée. Les couleurs d'aniline, notamment, ont fourni la matière de travaux très importants sur ce sujet.

en conclure que l'indice de l'air varie très peu avec la longueur d'onde; ce résultat étend celui qui était déjà connu, à savoir que la dispersion de l'air pour les radiations visibles est très faible.

Pour l'anhydride carbonique, l'accord est moins bon; et l'écart est très grand dans le cas de l'anhydride sulfureux.

Pour ces deux derniers corps, les constantes diélectriques sont plus grandes que le carré de l'indice pour la lumière jaune; si la loi de Maxwell était encore vraie, à condition de prendre pour l'indice la vraie valeur n_1 pour une radiation de longueur d'onde très grande, n_1 serait plus grand que n, ce qui est contraire à ce qu'on sait sur la variation de l'indice avec la longueur d'onde; il faudrait donc admettre que les gaz en question ont présenté pour des longueurs d'onde d'une certaine valeur le phénomène de la dispersion anomale dont l'effet se fait encore sentir.

En repoussant cette hypothèse, on est conduit à admettre que ces corps ne suivent pas la loi de Maxwell. C'est déjà la conclusion à laquelle avait été conduit Lebedew par son étude des vapeurs au voisinage de la température d'ébullition. Les deux gaz étudiés, déjà fort éloignés des gaz dits *permanents*, se comporteraient comme des vapeurs.

Quant aux constantes diélectriques de CO^2 liquide données par la seconde méthode, je ne puis les comparer qu'aux constantes données par Linde et à l'indice trouvé par Bleekrode pour 15° raie D.

Le Tableau XIII ci-après rassemble les résultats :

Tableau XIII.

	K.		n	
Température.	Linde.	Verain.	Bleekrode.	n^2.
— 7°,5....	1,621			
— 5.....	1,605	1,600		
0.....	1,579	1,58		
0.....	1,589			
6,5....	1,560	1,560		
8,5....	1,547	1,545		
10.....	1,535	1,535		
15,5....	1,530	1,510		
17,5....	1,526	1,495	1,192	1,42

Ici encore, la constante diélectrique est plus grande que le carré de l'indice de réfraction, et l'on est conduit aux mêmes conclusions que dans le cas du gaz.

Les expériences faites sur d'autres corps, au voisinage du point critique, en particulier par B. Galitzine et J. Wilip sur l'éther éthylique, ont montré que l'indice de réfraction suit une variation continue quand le corps passe par le point critique; j'ai constaté une allure analogue pour la constante diélectrique.

2. *La loi de Mossotti-Clausius.* — La formule connue sous le nom de *formule de Mossotti-Clausius* a été établie par divers auteurs qui, bien que partant d'hypothèses différentes, ont été conduits au même résultat.

En 1850, Mossotti (37), reprenant l'hypothèse de Faraday que les diélectriques sont formés de corpuscules conducteurs, sphériques, et ne se touchant pas, placés dans un isolant parfait, avait établi une théorie analogue à la théorie du Magnétisme de Poisson et en avait tiré l'explication des phénomènes connus.

Clausius (8) ajouta, en 1879, à ces hypothèses celle que les corpuscules conducteurs sphériques se trouvent

à des distances les uns des autres qui sont grandes par rapport à leurs dimensions. Il désigne par g le coefficient de remplissage du milieu, c'est-à-dire le rapport du volume occupé réellement par les molécules en question au volume total du corps et établit que la constante diélectrique est liée à g par la relation

$$K = \frac{1 + 2g}{1 - g} \qquad \text{ou} \qquad g = \frac{K - 1}{K + 2}.$$

Wiedemann (52) et Poincaré (44) sont arrivés au même résultat par une voie un peu différente. Mascart et Joubert (34) ne supposent plus les corpuscules conducteurs; ils admettent, au contraire, qu'ils sont parfaitement isolants et doués d'une constante diélectrique infiniment grande; ils retombent encore sur les mêmes relations.

Si nous considérons l'unité de volume du corps, le nombre g aura pour valeur le volume qui y est occupé par les molécules; soient γ le volume d'une molécule, μ sa masse, N le nombre de molécules contenues dans l'unité de volume, d la densité du corps; on a

$$d = N\mu \qquad \text{et} \qquad g = N\gamma,$$

d'où

$$\frac{g}{d} = \frac{\gamma}{\mu},$$

et, par suite,

$$\frac{K - 1}{K + 2}\frac{1}{d} = \frac{\gamma}{\mu}.$$

Or, $\frac{\mu}{\gamma}$ est le rapport de la masse au volume d'une molécule, c'est-à-dire la densité d'une molécule; c'est donc aussi la densité qu'aurait le corps si toutes les molécules se touchaient sans vides, ou bien la densité maxima D que le corps puisse avoir. Les différents auteurs considèrent cette quantité comme une grandeur caractéristique du corps, indépendante de sa température, de sa pression, de son état physique, au même titre que sa

masse; ils sont donc conduits à la relation

$$\frac{K-1}{K+2}\frac{1}{d} = \frac{1}{D} = \text{const.} \quad (^1).$$

Comme je l'ai fait remarquer, dans les conditions où les gaz ont été étudiés par la première méthode, la formule

$$\frac{K-1}{K+2}\frac{1}{d} = \text{const.}$$

se réduit à

$$\frac{K-1}{d} = \text{const.}$$

Boltzmann et Klemenčič l'ont vérifié pour l'air et CO^2 lorsque la densité varie à température constante par suite de variations de pression, entre la pression atmosphérique et une pression de quelques millimètres de mercure.

Les nombres que j'ai relevés permettent l'examen de cette formule dans un intervalle de pressions beaucoup plus étendu et pour diverses températures :

1° Dans le cas de l'air, j'ai montré que, à température constante, K — 1 est rigoureusement proportionnel à la pression pour des pressions allant jusque 500^{cm} de mercure et des températures comprises entre 9° et 70°.

En relevant pour les températures intermédiaires les constantes diélectriques relatives à une pression de 76^{cm} de mercure pour chaque température, j'ai construit la courbe de la figure 9.

Si K — 1 est proportionnel à la densité lorsque la température varie, en divisant par $1+\alpha t$ la valeur (1,000585)

---

(1) Enfin, en 1880, Lorentz (32) et Lorenz (33) étudiant la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu transparent, de densité d, ont montré que

$$\frac{n^2-1}{n^2+1}\cdot\frac{1}{d}$$

doit être une constante, quels que soient la température et l'état physique du corps. Dans le cas où la loi de Maxwell est applicable, cette relation est la même que celle de Mossotti-Clausius.

de K — 1 à 0°, on doit obtenir sa valeur pour la température de t°. Dans le Tableau XIV ci-dessous, j'ai rassemblé les valeurs calculées et les valeurs lues sur la courbe pour diverses températures. Comme on le voit, il y a un accord très satisfaisant entre les nombres des deux dernières colonnes. Il en serait de même pour d'autres pressions et l'on peut considérer la loi comme vérifiée (1).

TABLEAU XIV.

Températures.	$1+\alpha t$.	$\frac{K_0-1}{1+\alpha t}$.	K — 1 observé.
0			
0.....	1,000	0,000585	0,000585
10.....	1,037	0,000565	0,000564
20.....	1,073	0,000545	0,000525
30.....	1,100	0,000527	0,000525
40.....	1,146	0,000511	0,000508
50.....	1,183	0,000493	0,000492
60.....	1,219	0,000479	0,000478
70.....	1,256	0,000466	0,000464

2° L'anhydride carbonique ne m'a pas donné pour une température déterminée une constante diélectrique proportionnelle à la pression. Mais, comme on sait, aux températures auxquelles ont eu lieu les expériences, ce corps

(1) Dans les expériences qu'ils publièrent, en 1888, sur la réfraction et la compressibilité de divers gaz, MM. Chappuis et Rivière (7) avaient trouvé une vérification rigoureuse de la loi

$$\frac{n-1}{d} = \text{const.}$$

de 0^{atm} à 20^{atm} et à 21°.

Il faut remarquer que, dans le cas de nombres très peu différents de 1, comme les indices de réfraction de gaz, $n-1$ et n^2-1, sont sensiblement proportionnels; en posant

$$n = 1+\varepsilon,$$

on a

$$(1+\varepsilon)^2 = 1+2\varepsilon+\varepsilon^2;$$

ce dernier terme est, en général, négligeable, et l'on a

$$n^2-1 = 2(n-1).$$

s'écarte déjà notablement de la loi de Mariotte : il est plus compressible qu'elle ne l'indique; il en résulte que la densité augmente plus que proportionnellement à la pression; si la loi de Mossotti-Clausius est vraie, ou si plus simplement, $\frac{K-1}{d}$ est une constante, $K-1$ doit suivre une marche analogue à celle de d.

Pour le vérifier, il faut avoir recours aux études de la compressibilité qui ont été faites sur le gaz carbonique. Regnault (45) donne les valeurs du rapport

$$\frac{p_0 v_0}{p_1 v_1}$$

pour $p_1 = 2\,p_0$ à 0°.

TABLEAU XV.

p_1 en mm de Hg :	$\frac{p_0 v_0}{p_1 v_1}$.
764,0	1,007597
1414,8	1,012313
2164,8	1,018973
3186,4	1,028494
4879,8	1,045625
6820,2	1,066137

Le poids du litre de CO^2 à 0° et 760^{mm} de mercure, est de 1^g,9652.

Il est facile, en partant de ces données, de calculer la densité de CO^2 pour diverses pressions, 76^{cm}, 2×76^{cm}, 3×76^{cm}, 4×76^{cm}, 5×76^{cm} de mercure (1).

(1) Pour faire ce calcul, j'ai tracé la courbe représentant les variations du rapport $A = \frac{p_0 v_0}{p_1 v_1}$ en ordonnées pour les valeurs de p_1 portées en abscisses; j'ai pu, grâce à ce graphique, passer de la densité connue à 0° et 76^{cm} de Hg à celles qui correspondent à 2×76^{cm}, 4×76^{cm} et 8×76^{cm} de Hg, en remarquant que

$$\frac{p_0 v_0}{p_1 v_1} = A \qquad \text{pour} \qquad p_1 = 2\,p_0$$

donne

$$\frac{p_0 v_0}{2\,p_0 v_1} = A \qquad \text{ou} \qquad \frac{v_0}{v_1} = \frac{d_1}{d_0} = 2A.$$

TABLEAU XVI.

Pressions en cm.	Densité.	K — 1 à 0°.	$\frac{K-1}{d}$.
76	1,518	0,000975	0,000642
2 × 76	3,08	0,001930	0,000625
3 × 76	4,75	0,002980	0,000627
4 × 76	6,33	0,004040	0,000638
5 × 76	8,00	0,005400	0,000675

Dans les deux dernières colonnes, j'ai indiqué les valeurs que j'ai trouvées par extrapolation pour la constante à 0° et pour les mêmes pressions puis les valeurs du rapport $\frac{K-1}{d}$. On voit que, ici encore, ce rapport est assez constant pour confirmer la loi théorique dans le cas de variations de pression.

Examinons maintenant ce qui se passe à pression constante et température variable. D'après Regnault, le coefficient de dilatation de CO^2 à pression constante de 0° à 100°, pour la pression de 760^{mm} de mercure, est de $\alpha' = 0{,}0037099$, soit 0,00371; comme je l'ai fait pour l'air, je vais comparer les valeurs de $\frac{K_0-1}{1+\alpha' t}$ aux valeurs de K — 1 qui ont été observées.

TABLEAU XVII.

Températures.	$1+\alpha' t$.	$\frac{K_0-1}{1+\alpha' t}$.	K — 1 observé.
0	1,0000	0,000975	0,000975
10	1,0371	0,000938	0,000925
20	1,0742	0,000906	0,000900
30	1,1113	0,000876	0,000875
40	1,1484	0,000848	0,000830
50	1,1855	0,000821	0,000810
60	1,2226	0,000797	0,000795
70	1,2597	0,000773	0,000775

En refaisant la même opération pour la courbe relative

à 304^{cm} de mercure, le coefficient étant, toujours d'après le même auteur, 0,00385, on a :

Tableau XVIII.

Températures.	$1+\alpha' t$.	$\frac{K_0-1}{1+\alpha' t}$.	K — 1 observé.
0			
0.....	1,0000	0,00404	0,00404
10.....	1,0385	0,00389	0,00389
20.....	1,0770	0,00375	0,00376
30.....	1,1150	0,00362	0,00365
40.....	1,1540	0,00349	0,00350
50.....	1,1925	0,00339	0,00335
60.....	1,2310	0,00327	0,00324
70.....	1,2695	0,00318	0,00314

Ces deux Tableaux montrent un accord aussi parfait qu'on peut le désirer entre les valeurs calculées et les valeurs observées de K — 1.

Dans le cas de l'anhydride carbonique gazeux, la quantité $\frac{K-1}{d}$ est constante pour des températures comprises entre 0° et 70° et des pressions comprises entre quelques millimètres et 4300^{mm} de mercure.

3° L'anhydride sulfureux donne, à température constante une forme de courbe qui n'est plus explicable par la compressibilité de ce gaz plus grande que ne le prévoit la loi de Mariotte; alors que la densité augmente plus que proportionnellement à la pression, la constante diélectrique augmente moins vite. J'ai craint tout d'abord que ces résultats ne soient faussés par un commencement de conductibilité du gaz qui se manifeste, comme je l'ai déjà signalé, bien avant la pression de liquéfaction à la température de l'expérience; cette hypothèse confirmerait l'écart entre la constante diélectrique que j'ai trouvée et celle qui est donnée par Klemečič et par Bädeker pour 0° et 760^{mm} de mercure. En présence de cette divergence, inexplicable après le bon accord trouvé

pour les autres gaz, j'ai révisé complètement mon appareil, vérifié que pour des pressions égales ou même un peu supérieures à 76^{cm} de mercure, et pour les températures auxquelles j'ai opéré, le gaz sulfureux donnait un isolement très suffisant pour les mesures, ce qui me permet de supposer l'exactitude des nombres que j'ai trouvés.

En ce qui concerne l'influence de la température, à pression constante, en admettant le coefficient de dilatation indiqué par Regnault, de 0,003902, on devrait trouver par l'expérience les valeurs de la constante diélectrique indiquées dans la troisième colonne du Tableau ci-dessous alors qu'on trouve celles de la quatrième colonne.

TABLEAU XIX.

Températures.	$1+\alpha'' t$.	$\frac{K_0-1}{1+\alpha'' t}$.	$K-1$ observé.
0			
0.....	1,0000	0,00906	0,00906
10.....	1,039	0,00873	0,00860
20.....	1,078	0,00840	0,00812
30.....	1,117	0,00812	0,00769
40.....	1,156	0,00784	0,00730
50.....	1,195	0,00758	0,00695
60.....	1,234	0,00733	0,00662

Il y a donc désaccord complet entre la théorie et la réalité; mais ce résultat vient confirmer une loi empirique, qui avait été remarquée par Bädeker : lorsque la loi de Maxwell n'est pas vérifiée, la formule de Mossotti-Clausius ne l'est pas non plus, et l'écart est dans un sens tel que, lorsque la température s'élève, la constante diélectrique se rapproche du carré de l'indice.

4° En ce qui concerne l'anhydride carbonique liquéfié, pour voir dans quelle mesure les résultats qu'il a trouvés sont d'accord avec la formule de Mossotti-Clausius, Linde partage le problème en deux parties. Il calcule d'abord pour la comparer à la valeur qu'il a trouvée la

constante diélectrique du liquide en partant de celle du gaz déterminée par Klemenčič à 0°; de cette dernière, il déduit

$$D = \frac{K_{gaz} + 2}{K_{gaz} - 1} d_{gaz},$$

puis calcule

$$K_{liquide} = \frac{D + 2 d_{liquide}}{D - d_{liquide}},$$

en prenant pour $d_{liquide}$ la valeur indiquée par M. Amagat.

Il trouve ainsi à 0° une constante pour le liquide qui est de 4,4 pour 100 plus faible que celle qu'il a observée.

Il examine ensuite comment la même théorie représente les faits pour un corps dont l'état physique ne change pas. En portant les températures en abscisses, il trace les deux courbes de la constante diélectrique de l'anhydride carbonique liquéfié :

1° *Déterminée* expérimentalement;

2° *Calculée* en partant d'une valeur relevée dans des conditions arbitraires, passant à la densité maxima, puis à la constante diélectrique pour diverses températures par le même procédé que ci-dessus. Il trouve que la courbe expérimentale a sa concavité tournée vers le haut, tandis que la courbe calculée la tourne vers le bas.

Sur ce point, nos résultats ne sont pas d'accord, attendu que, d'après mes mesures, la courbe de la constante trouvée expérimentalement a sa concavité tournée vers le bas comme celle que le calcul a donnée à Linde.

J'ai jugé plus pratique, pour la vérification de la formule théorique, de calculer la densité maxima de CO^2 en partant des valeurs de la constante diélectrique que j'ai trouvées pour le liquide et pour la vapeur à diverses températures; les densités réelles ont été empruntées à

un Mémoire de M. Amagat. Les résultats sont consignés dans le Tableau ci-dessous :

TABLEAU XX.

Températures.	Liquide. K.	Liquide. *d*.	Liquide. D.	Vapeur. K.	Vapeur. *d*.	Vapeur. D.
0°						
0....	1,58	0,914	5,63	1,04	0,096	7,28
10....	1,54	0,856	5,61	1,07	0,133	5,82
20....	1,48	0,766	5,56	1,11	0,190	5,37
25....	1,425	0,700	5,63	1,15	0,240	5,04
30....	1,32	0,598	6,2	1,20	0,334	5,36

Si l'on prend 1,25 comme valeur de la constante lue sur la courbe au point critique, avec $d = 0{,}464$, on est conduit à $D = 6{,}03$.

Ces résultats sont en accord très satisfaisant avec la loi de Mossotti-Clausius; si l'on fait abstraction du nombre relatif au gaz à 0°, on constate que les variations de D ne dépassent pas 20 pour 100 de sa valeur. D'après la forme de D, il est facile de s'expliquer ces écarts : une erreur de quelques pour cent sur K qui est voisin de 1, peut donner une erreur relative très grande sur K — 1, et elle se retrouve dans D qui lui est proportionnel.

Il est possible d'ailleurs de calculer D en partant des valeurs données par la première méthode, qui mesurait K — 1 avec précision. Nous avons vu qu'à 0°, sous une pression de 380^{cm} de mercure, la constante diélectrique de CO^2 est 1,0054; sa densité, dans les mêmes conditions, est 8, rapportée à l'air; on a donc

$$\frac{1}{D} = \frac{0{,}0054}{3{,}0054}\,\frac{1000}{8 \times 1{,}293} = \frac{1}{5{,}64}.$$

Ce nombre concorde tout à fait avec les valeurs du

Tableau précédent, et l'on peut dire que l'anhydride carbonique gazeux, sous de faibles pressions, ou bien fortement comprimé ou liquide au voisinage du point critique, vérifie la loi de Mossotti-Clausius.

5° J'ai repris les résultats donnés par l'anhydride sulfureux dans les expériences préliminaires; tout d'abord, ils s'écartent notablement des nombres que Linde et Eversheim ont obtenus par la méthode de Nernst. A 23°, le premier a trouvé que la constante diélectrique de SO^2 est 14,8; le second indique 14,3 à 14°,5 et 13,3 à 32°, c'est-à-dire des résultats un peu plus faibles. En recourant à la figure 29, je trouve, pour 23°, K = 7,85; d'autre part, en me reportant aux expériences de Cailletet et Mathias sur la densité de SO^2 liquide, j'ai pu déterminer sa densité maxima pour quelques températures en partant des diverses valeurs de la constante diélectrique; les résultats sont contenus dans le Tableau suivant :

Tableau XXI.

Températures.	Densité.	Linde.		Eversheim.		Verain.	
		K.	D.	K.	D.	K.	D.
5°....	1,435					9,2	1,97
14,5..	1,405			14,3	1,72	8,35	1,98
23....	1,380	14,8	1,68			7,85	1,99
32....	1,360			13,3	1,69	7,25	2,01
51 ...	1,300			11,6	1,67		
90,5..	1,150			8,53	1,61		
129....	0,96			5,60	1,59		
139,5..	0,88			4,76	1,58		
149....	0.76			4,22	1,47		
152....	0,70			3,53	1,53		
154,5..	0,677			2,10	2,5		

Comme on le voit, il y a un grand désaccord entre les

divers résultats; même en prenant les résultats d'un seul auteur, l'anhydride sulfureux ne vérifie pas la loi de Mossotti-Clausius. D'autre part, si l'on calcule D à partir des résultats donnés par la méthode statique, on trouve des nombres tout à fait différents des valeurs ci-dessus :

Tableau XXII.

Températures.	Poids d'un litre en grammes (0°-76).	K.	D.
0			
0.....	2,86	1,00906	0,95
20.....	2,57	1,00812	1,19
40.....	2,48	1,00730	1,27

Il est bien regrettable que Eversheim n'ait pas mesuré les constantes diélectriques de SO^2 gaz pour les températures pour lesquelles il a étudié le liquide; son but était uniquement de comparer le liquide pur, puis tenant en dissolution divers corps.

Il est encore un autre point sur lequel CO^2 et SO^2 liquéfiés sont notablement différents. J'ai montré que la résistance électrique de CO^2 liquide est énorme (p. 87); celle de SO^2 qui m'a servi est beaucoup plus faible; à 16°, j'ai trouvé pour la résistance de mon tube 80 000 ohms par la méthode de Kohlrausch, ce qui conduit à une résistivité de 40 000 ohms par centimètre environ. Eversheim donne 115 000 ohms pour cette température. Peut-être y aurait-il là une cause d'absorption, puis de dispersion anormale expliquant l'écart entre mes résultats et ceux des deux autres auteurs qui opéraient avec des longueurs d'onde sensiblement infinies.

Quoi qu'il en soit, l'énorme différence entre les propriétés de l'anhydride carbonique au voisinage du point critique et celles de l'anhydride sulfureux rendrait fort intéressante une étude de ce dernier corps analogue

à celle que j'ai faite pour le premier. Malheureusement, les expériences seraient encore beaucoup plus difficiles en raison de la température de 154° qu'il faudrait atteindre : la pression critique est de 78^{atm} et les tubes en verre nu pourraient difficilement résister à une telle pression avec d'aussi grands écarts de température.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Dans les expériences que j'ai décrites dans la première Partie de ce travail, j'ai mesuré par une méthode statique les constantes diélectriques de l'air, de l'anhydride carbonique et de l'anhydride sulfureux pour des températures comprises entre 0° et 70°, et des pressions atteignant $6^{atm},5$ pour les deux premiers corps et $2^{atm},4$ pour le troisième.

J'ai trouvé des résultats sensiblement d'accord avec ceux de mes prédécesseurs. La loi de Maxwell se trouve parfaitement vérifiée pour l'air; beaucoup moins bien pour les deux autres gaz.

La loi de Mossotti-Clausius, vérifiée pour l'air et l'acide carbonique avec autant de précision qu'on peut l'espérer, ne l'est pas pour le gaz sulfureux.

Dans la seconde Partie, j'ai déterminé, pour une longueur d'onde déterminée, la constante diélectrique de l'anhydride carbonique, à l'état de vapeur et de liquide, à diverses températures comprises entre — 4° et la température critique de 31°,4, sous la pression de vapeur saturante correspondante. J'ai trouvé une variation continue de la constante diélectrique lors du passage au point critique. D'autre part, le calcul de la densité maxima de ce corps par la formule de Mossotti-Clausius donne une valeur suffisamment constante et d'accord avec les premières expériences pour confirmer les hypothèses qui servent de base à cette théorie.

Le gaz sulfureux étudié sommairement et loin du point critique a donné des résultats beaucoup moins concordants.

Vu et approuvé :
Nancy, le 7 octobre 1912.
Le Doyen le la Faculté des Sciences,
G. FLOQUET.

Vu et permis d'imprimer :
Nancy, le 7 octobre 1912.
Le Recteur de l'Académie de Nancy,
Ch. ADAM.

BIBLIOGRAPHIE.

J'ai rassemblé ci-dessous les indications bibliographiques des Articles et Mémoires cités dans mon travail. J'y ai joint celles d'Ouvrages qui ne m'ont pas été utiles directement, mais qui se rapportent néanmoins à la question de la constante diélectrique des gaz, des vapeurs et des corps liquéfiés.

Les numéros qui les précèdent sont ceux auxquels renvoient les numéros placés dans le texte.

Pour les principaux périodiques consultés, j'ai adopté les abréviations suivantes :

C. R. — *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, Gauthier-Villars, Paris.

Ann. chim. Phys. — *Annales de Chimie et de Physique*, Gauthier-Villars, Paris.

Zeits. Phys. Chem. — *Zeitschrift für physikalische Chemie, Stöchiométrie und Verwandtschaftslehre*, Wilhelm Engelmann, Leipzig.

Pogg. Ann. — *Annalen der Physik und Chemie*, Johann Ambr. Barth., Leipzig (*Annales de Poggendorff*).

Wied. Ann. — *Annalen der Physik und Chemie*, Johann Ambr. Barth., Leipzig (*Annales de Wiedemann*).

Drudes Ann. — *Annalen der Physik und Chemie*, Johann Ambr. Barth., Leipzig (*Annales de Drude*).

Wien. Ber. — *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Wien, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, Karl Gerold's Sohn. Wien.

Proc. Roy. Soc. Lond. — *Proceedings of the Royal Society of London*, Harrison and Sons. London.

1. Amagat, *Sur la détermination de la densité des gaz liquéfiés et de leurs vapeurs saturées. Eléments du point critique de l'acide carbonique* (*C. R.*, t. CXIV, 16 mai et 7 juin 1892).

2. Ayrton et Perry, *Asiatic Society of Japan*, avril 1877, ou bien Gordon, *Traité expérimental d'Electricité et de Magnétisme*, Trad. Raynaud; Baillère, éd., Paris, 1881.

3. Behn et Kiebitz, *Boltzmann's Festschrift.* Joh. Ambr. Barth, éd., Leipzig, 1904, p. 610.

4. Bädeker, *Experimentaluntersuchungen über die Dielektrizitätsconstante einiger Gaze und Dämpfe in ihrer Abhängigkeit von der Temperature* (*Zeits. Phys. Chem.*, t. XXXVI, 1901, I, p. 30.).

5. Boltzmann, *Experimentelle Bestimmung der Dielektrizitätsconstante einiger Gase.* (*Wien. Ber.*, t. LXIX, 1874, p. 795 et *Pogg. Ann.*, t. CLV, 1875, p. 403).

6. Cailletet et Mathias. *Recherches sur la densité de l'acide sulfureux à l'état de liquide et de vapeur saturée* (*C. R.*, t. CIV, 1887, p. 1563).

7. Chappuis et Rivière, *Sur la réfraction des gaz comparée à leur compressibilité* (*Ann. Chim. Phys.*, 6e série, t. XIV, 1888, p. 5).

8. Clausius, *Mechanische Wärmetheorie*, t. II, 1879, p. 64.

9. Dewar, *Cf.* Fleming.

10. Drude, 1° *Eine bequeme methode zur Demonstration des elektrischen Brechungsexponenten von Flüssigkeiten* (*Wied. Ann.*, t. LV, 1895, p. 633).

2° *Zwei methoden zur Messung der Dielektrizitätsconstante und der elektrischen Absorption bei schnellen Schwingungen* (*Zeits. Phys. Chem.*, t. XXIII, 1897, II, p. 267).

3° *Zur Theorie der anomalen elektrischen Dispersion* (*Wied. Ann.*, t. LXIV, 1898, p. 131).

11. Dwelshauvers-Déry, *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3e série, t. XXX, 1895, p. 570.

12. Eversheim, *Leitfähigheit und Dielektrizitätsconstante von Lösungsmitteln* (*Wied. Ann.* t. VIII, 1902, p. 539).

13. Faraday, *Experimental Researches*, t. XI, 1837, p. 1552).

14. Fleming et Dewar, *Dielectric constant of liquid Oxygen and liquid Air* (*Proc. Roy. Soc. Lond.*, t. LX, 1896, p. 358).

15. Franke, *Dielktrizitätsconstante flüssiger Körper in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur und die Mossotti-Clausius'sche Formel* (*Wied. Ann.*, t. L, p. 163).

16. Fomm, *Cf.* Graetz.

17. Fuchs, *Wien. Ber.*, t. XCVIII, 1889, p. 1240.

18. Galitzine (B.) et Wilip, *Rapports présentés au Congrès international de Physique de* 1900, Gauthier-Villars, Paris, t. I, p. 668.

19. Gouy, *Sur quelques phénomènes présentés par les tubes de Natterer* (*C. R.*, t. CXVI, 1893, p. 1289).

20. Graetz et Fomm, *Ueber normale und anomale Dispersion elektrischer Wellen* (*Wied. Ann.*, t. LIV, 1895, p. 626).

21. Hasenöhrl, *Wien. Ber.*, t. CV, 2 *a*, 1896, p. 460).

22. Helmholtz, *Monats Berichte des Berliner Akademie*, 1871.

23. Herwagen, *Ueber den temperaturcoefficienten der Dielektrizitätsconstante des reinen Wassers* (*Wied. Ann.*, t. XLIX, p. 272).

24. Hopkinson, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, t. XXVIII, 1877, p. 298.

25. Joubert, *Cf.*, Mascart.

26. Kiebitz, *Cf*, Behn.

27. Klemenčic, *Experimentaluntersuchungen über die Dielektrizitätsconstante einiger Gase und Dämpfe* (*Wien. Ber.*, t. XCI, p. 712 ou *Beiblatter*, t. X, 1886, p. 109).

28. Kohlrausch, *Das elektrische Leitungsvermögen der wässerigen Lösungen* (*Pogg. Ann.*, t. VI, 1879, p. 145).

29. Lang, *Ueber eine Beziehung zwischen der Dielektrizitätsconstante der Gase und ihrer chemischen Werthigkeit* (*Wied. Ann.*, t. LVI, p. 534).

30. Lebedew, *Ueber Messungen der Dielektrizitätsconstante der Dämpfe und uber die Mossotti-Clausius'sche Theorie der Dielektrica* (*Wied. Ann.*, t. XLIV, 1891, p.287).

31. Linde, *Messung der Dielektrizitätsconstanten verflüssigter Gase und die Mossotti-Clausius'sche Formel* (*Wied. Ann.*, t. LVI, 1895, p. 546).

32. Lorentz (H.), *Ueber die Beziehung zwischen der Fortpflanzung geschwindigkeit des Lichtes und der Körperdichte* (*Pogg. Ann.*, t. IX, 1880, p. 641).

33. Lorenz (L.) : 1° *Ueber die Refractionsconstante* (*Pogg. Ann.*, t. XI, 1880, p. 70).

2° *Theorie der Dispersion* (*Wied. Ann.*, t. XX, 1883, p. 1).

34. Mascart et Joubert, *Leçons sur l'Electricité et le Magnétisme*, 2e édit., t. I, p. 127, Gauthier-Villars, éd., Paris, 1896.

35. Mathias : 1° *Cf.* Cailletet.

2° *Le point critique des corps purs*, p. 88, Naud, éd., Paris, 1904.

36. Maxwell, *Philosophical Transactions*, t. CLV, 1865, p. 459.

37. Mossotti, *Memoria di matematica edi phisica della Soc. Ital. d. Sc. residente in Modena* (t. XIV, 2e série, 1850, p. 49).

38. Moulin, *L'électromètre à quadrants* (*Le Radium*, t. IV, 1907, p. 145 et 188).

39. Nernst, *Methode zur Bestimmung von Dielektrizitätsconstanten* (*Zeit. Phys. Chem.*, t. XIV, 1894, II, p. 622).

40. Oberbeck, *Ueber den Verlauf der elektrischen Schwingungen bei den Teslaschen Versuchen* (*Wied. Ann.*, t. LX, 1895, p. 623).

41. Perreau, *Etude expérimentale de la dispersion et de la réfraction des gaz* (*Ann. Chim. Phys.*, t. VII, 1896, p. 289).

42. Perry, *Cf.* Ayrton.

43. Pirani, *Dissertation*, Berlin, 1903.

44. Poincaré, *Electricité et Optique*, t. I, p. 41, Carré, éd., Paris, 1890.

45. Regnault, *Mémoires de l'Institut de France*, 1847, t. XXI, p. 329.

46. Rivière, *Cf.* Chappuis.

47. Roentgen, *Ueber den Einfluss des Druckes auf die Dielektrizitätsconstante des Wassers und des Aethylalkohols* (*Wied. Ann.*, t. LII, 1894, p. 953).

48. Schiller, *Einige experimentelle Untersuchungen über elektrische Schwingungen* (*Pogg. Ann.*, t. CLII, 1874, p. 535).

49. Silberstein, *Untersuchungen über die Dielektrizitätsconstante von Mischungen und Lösungen* (*Wied. Ann.*, t. LVI, 1895, p. 661).

50. Villard, *Sur les propriétés des gaz très purs au voisinage du point critique* (*Journal de Physique*, t. III, 1893, p. 441).

51. Werner, *Bestimmung von Dielektrizitätsconstanten mittels des Differentialinduktors* (*Wied. Ann.*, t. XLVII, 1892, p. 613).

52. Wiedemann, *Lehre von der Elektrizität*, t. II, 1883, p. 12.

53. Wien, *Ueber die Rückwirkung eines resonirenden Systems* (*Wied. Ann.*, t. LXI, 1897, p. 159).

54. Wilip, *Cf.* Galitzine.

55. Zehnder : 1° *Zur objektiven Darstellung der Hertz'scher Versuche über Strahlen elektrischer Kraft* (*Wied. Ann.*, t. XLVII, 1892, p. 77).

2° *Hertz'sche Versuche mit Strahlen elektrischer Kraft, durch Heliumröhren dargestellt* (*Physikalische Zeitschrift*, t. XIII, 1912, p. 446).

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

Introduction 1
Historique 1
État de la question 7
But des recherches et méthodes 8

Première Partie : *Méthode statique.*

Principe de la méthode. Généralités 11
Description des appareils 15
Les condensateurs 15
Canalisations de gaz 19
Les gaz étudiés 21
L'électromètre 24
Le levier de manœuvre 26
Les causes d'erreur systématiques 27
Marche d'une expérience 29
Précision de la méthode 32
Constantes diélectriques de l'air 34
Constantes diélectriques de CO^2 35
Constantes diélectriques de SO^2 37

Deuxième Partie : *Méthode des oscillations.*

Principe de la méthode. Généralités 42
Description des appareils 45
Oscillateur et ligne 45
Tube à vide 48
Tube condensateur 51
Alimentation de l'oscillateur 56
Réglage des appareils 57
Étalonnage du tube. Corrections dues au bain d'huile 60
Remplissage du tube de Natterer 69
Marche d'une expérience 77

Pages.

Résultats..... 79
Précision..... 83
Conductibilité de CO^2 liquéfié..... 87
Expériences sur SO^2 liquéfié..... 88

Troisième Partie.

La relation de Maxwell dans le cas des gaz..... 92
Application aux résultats trouvés..... 94
La formule de Mossotti-Clausius dans le cas des gaz..... 96
Application aux résultats trouvés..... 98

Résumé et conclusions..... 108

Bibliographie..... 111

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Métallurgie au four électrique du fer et de ses alliages peu fusibles.

Vu et approuvé :

Nancy, le 7 octobre 1912.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

G. FLOQUET.

Vu et permis d'imprimer :

Nancy, le 7 octobre 1912.

Le Recteur de l'Académie de Nancy,

Ch. ADAM.

50713 Paris. — Imp. GAUTHIER-VILLARS, 55, quai des Grands-Augustins.

50660 PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS.
Quai des Grands-Augustins, 55.